

**Caracterização das pressões junto ao fundo a jusante de
comportas segmento invertida
Priscila dos Santos Priebe**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
RECURSOS HÍDRICOS**



Dissertação

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO A
JUSANTE DE COMPORTAS SEGMENTO INVERTIDA**

PRISCILA DOS SANTOS PRIEBE

Pelotas, 2016.

Priscila dos Santos Priebe

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO A JUSANTE DE
COMPORTAS SEGMENTO INVERTIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Dai Prá

Pelotas, março de 2016.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P948c Priebe, Priscila dos Santos

Caracterização das pressões junto ao fundo a jusante de comportas segmento invertida / Priscila dos Santos Priebe ; Mauricio Dai Prá, orientador. — Pelotas, 2016.

173 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Esforços hidráulicos extremos. 2. Pressões médias. 3. Flutuações de pressões. 4. Modelos hidráulicos. 5. Estruturas hidráulicas. I. Prá, Mauricio Dai, orient. II. Título.

CDD : 627

Priscila dos Santos Priebe

**CARACTERIZAÇÃO DAS PRESSÕES JUNTO AO FUNDO A JUSANTE DE
COMPORTAS SEGMENTO INVERTIDA**

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para a obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 02 de março de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá (Orientador), Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, Doutor en Département de Génie Civil pela Université Laval.

Profa. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto, Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira, Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dedico este trabalho aos meus pais Guido e Leni e
ao meu namorado Renan.

Agradecimentos

Em especial à Deus, por ter me dado forças nos momentos difíceis e guiado minha vida no caminho certo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauricio Dai Prá pela confiança, dedicação, exemplo de seriedade, caráter e competência profissional.

Aos bolsistas e colegas do Laboratório de Hidráulica da Engenharia Hídrica, em especial, ao João Pedro, Bruna Sell, Joana Gusmão, Maria Netta e Aline Abreu, que contribuíram para a construção desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela oportunidade e pelos conhecimentos passados durante o mestrado e ao Curso de Graduação em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas.

À FAPERGS, pela concessão da bolsa de mestrado.

À FINEP, pelo financiamento do projeto.

Aos meu pais Guido e Leni, meus grandes incentivadores que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui, obrigada pelo amor e dedicação que sempre tiveram comigo.

Ao meu namorado Renan, por sua compreensão, apoio, motivação e por seu amor.

À minha família que sempre me deram total apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, em especial, à minha prima Tatielen que é uma verdadeira irmã.

Às minhas grandes amigas Emanuele e Tuane, que sempre estiveram ao meu lado me dando força e apoio.

Enfim, às demais pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização desta etapa, expresso aqui o meu agradecimento.

*“Grandes realizações sempre acontecem em uma
estrutura de grandes expectativas”
(Jack Kinder)*

Resumo

PRIEBE, Priscila dos Santos. **Caracterização das pressões junto ao fundo a jusante de comportas segmento invertida**. 2016. 173f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

O escoamento a jusante de comportas em qualquer estrutura hidráulica é altamente turbulento e complexo, devido a ocorrência de altas velocidades e bruscas variações de pressões nesta região, apresentando um comportamento na distribuição de pressão semelhante ao do ressalto hidráulico submerso à superfície livre. Uma das formas de quantificar e estimar os esforços que ocorrem nas estruturas hidráulicas a jusante de comportas é através da utilização de modelos reduzidos, os quais permitem a medição de grandezas físicas. Com isso, o objetivo desta pesquisa é caracterizar as pressões induzidas na base pelo escoamento a jusante de comporta em condutos retangulares criando um método de previsões de pressões extremas para a base com distintas probabilidades de ocorrências a partir de parâmetros adimensionais, conforme a proposta de Marques et al., (1997). Os aspectos metodológicos dessa pesquisa iniciaram-se por uma investigação experimental detalhada sobre as características hidráulicas do escoamento a jusante de uma comporta em um modelo físico hidráulico de um aqueduto de um sistema de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação de média/alta queda. Este modelo foi implantado no Laboratório de Hidráulica do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas. Realizou-se medição e análise de grandezas físicas, principalmente, das distribuições longitudinais de pressões, em termos médios, flutuantes e extremos que ocorrem em diferentes vazões e aberturas da comporta. Através da análise dos dados caracterizou-se o comportamento das pressões médias, das flutuações de pressões e das pressões máximas e mínimas ao longo da base do conduto sob diferentes condições de vazão e grau de abertura da comporta, onde constatou-se que as situações mais críticas de funcionamento do sistema para as vazões e aberturas ensaiadas foram para as aberturas de 30% e 40% e vazões de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e $31,8\text{L.s}^{-1}$, respectivamente. A partir da análise dos dados caracterizou-se o comportamento das pressões médias e das flutuações de pressão ao longo da base do conduto por meio da relação entre coeficientes adimensionais de posição e pressão, que juntamente com os coeficientes estatísticos com determinada probabilidade de não-excedência, também propostos nesta pesquisa, é possível estimar as pressões atuantes na base de um conduto retangular a jusante de comporta, com determinada probabilidade de não-excedência, ainda na etapa de projeto, aumentando a eficiência e a segurança do projeto destes sistemas. O método proposto nesta pesquisa fornece resultados satisfatórios, quando verificado com dados experimentais de outro modelo físico.

Palavras-Chaves: Esforços hidráulicos extremos; pressões médias; flutuações de pressões; modelos hidráulicos; estruturas hidráulicas.

Abstract

PRIEBE, Priscila dos Santos. **Pressure characterization downstream at the bottom of a reverse tainter gate**. 2016. 173f. Dissertation (Master Degree Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

Flow downstream of gates in any hydraulic structure is highly turbulent and complex, due to the occurrence of high velocities and abrupt pressure variations in that region, presenting a pressure distribution behavior similar to that of a hydraulic jump submerged in a free surface. One way of quantifying and estimating the forces occurring on the hydraulic structures downstream of gates is through the use of reduced models, which allow the measurement of physical magnitudes. Accordingly, the aim of this research is to characterize the induced pressures on the base due to flow downstream of gates in rectangular conduits building a method that allows the forecasting of extreme pressures for the base with different possibilities of occurrence using adimensional parameters, as suggested by Marques et al., (1997). The methodological aspects of this research began with an detailed experimental investigation regarding the hydraulic flow characteristics downstream of a gates in a hydraulic physical model in an aqueduct of a filling/emptying system of a navigation lock of medium/high drop. This model was implanted in the Laboratório de Hidráulica of course Engenharia Hídrica, in the Universidade Federal de Pelotas. The measuring, physical magnitudes analysis, and mainly, the longitudinal pressure distribution in average, fluctuations and extreme terms occurring in different flow rates and gate openings were all conducted. Through the data analysis were characterized the behavior of average pressures, the fluctuations pressures and the maximum and minimum pressures along the base of the conduit under different flow rate conditions and gate openings, where were found that the most critic operating situation of the system for the flow rates and openings tested were the openings of 30% and 40% and the flow rates of 23.0L.s^{-1} and 31.8L.s^{-1} , respectively. From the data analysis, the behavior of the average pressures and the fluctuating pressures along the base of the conduit were characterized through the correlation of admensional coefficients of position and pressure, that alongside the static coefficients with a determined probability of non-exceedance, also proposed on this research, made possible the estimation of the acting pressures on the base of a rectangular conduit downstream of a gate, with a determined probability of non-exceedance, during the project phase, rising the efficiency and the safety of the project of these systems. The method proposed in this research provides satisfactory results, when verified with experimental data in another physical model.

Keywords: Extreme hydraulic efforts; average pressures; fluctuating pressures; hydraulic models; hydraulic structures.

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Comportas hidráulicas (a) segmento, (b) plana, (c) basculante, (d) setor, (e) tambor. Fonte: USSACE, 2011; BIANCO, 2016. | 23 |
| Figura 2 - Desenho esquemático da instalação de (a) comporta segmento e (b) comporta segmento invertida. Fonte: adaptado de USACE, 2011. | 24 |
| Figura 3 - Visualização da <i>vena contracta</i> . Fonte: Adaptado de Palauro (2014)..... | 25 |
| Figura 4 - escoamento livre a jusante de comporta Fonte: Adaptado de Lin et al., (2002)..... | 25 |
| Figura 5 - Coeficiente de contração para comporta invertida para diferentes autores. Fonte: Kempka, 2014. | 26 |
| Figura 6 - escoamento a jusante de comporta (a) livre e (b) afogado. Fonte: adaptado de Çengel & Cimbala (2007). | 27 |
| Figura 7 - escoamento a jusante de comporta..... | 27 |
| Figura 8 - Funcionamento de uma eclusa. Fonte: http://quaradouro.blogspot.com.br/2010/11/eclusas-o-fim-de-uma-longa-espera.html | 30 |
| Figura 9 - Processo de erosão por cavitação em grandes proporções a jusante de uma comporta segmento em um descarregador de fundo. Fonte: Palu et al., 2010 . | 32 |
| Figura 10 - Comportamento do ressalto hidráulico a jusante de comporta. Fonte: PETERKA, 1974..... | 34 |
| Figura 11 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos. Fonte: SHARMA, 1976 apud BATTISTON, 2013. | 35 |
| Figura 12 - Limitação da altura da lâmina de água pelo teto do conduto. Fonte: Smith & Chen, 1989 apud Battiston, 2009..... | 37 |
| Figura 13 - Ressalto Hidráulico a jusante de comporta (Y_R = altura conjugada rápida, Y_L = altura conjugada lenta, Y_3 = lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto, L_r = comprimento do rolo, L_j = comprimento do ressalto livre, L_{sj} = comprimento do ressalto afogado e X = posição de início do ressalto, para o ressalto hidráulico livre considera-se a seção referente à altura conjugada Y_1 e para o ressalto submergido considera-se a posição da face de jusante da comporta). Fonte: adaptada de Trierweiler e Marques (2008)..... | 38 |
| Figura 14 - Comporta plana (A) com paramento de montante (B) com paramento de jusante. Fonte: Adaptado de Erbiste, 1987. | 39 |
| Figura 15 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e (a) pressão média, (b) flutuação de pressão, (c) pressão mínima 0,1% e (d) pressão mínima 1% para a base do conduto. Fonte: Battiston, 2013..... | 43 |
| Figura 16 - Modelo físico do sistema hidráulico. Autor: Fernanda Fernandes M. de Oliveira | 46 |
| Figura 17 - Sistema de Armazenamento..... | 46 |
| Figura 18 - Sistema de bombeamento e inversor de frequências. | 47 |
| Figura 19 - Sistema de circulação..... | 48 |
| Figura 20 - Medidor eletromagnético de vazão. | 49 |
| Figura 21 - Seção de interesse do estudo..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 - Comporta tipo segmento invertido | 50 |
| Figura 23 - Disposição das tomadas de pressão na base do conduto (as medidas estão em centímetros)..... | 50 |
| Figura 24 - (a) Vista do reservatório, condutos e canal de restituição, (b) Vista do reservatório, condutos e tubulação dos sistema de alimentação. Fonte: Battiston, 2013. | 57 |
| Figura 25 - Sistema de registro da abertura da comporta. Fonte: Battiston, 2013 | 58 |
| Figura 26 - (a) Medição de pressões médias por meio de piezômetros, (b) Transdutores de pressão, a jusante da comporta, utilizados para medir as pressões instantâneas. Fonte: Kempka, 2014. | 58 |
| Figura 27 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 30% | 62 |
| Figura 28 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 50% | 62 |
| Figura 29 - Comportamento das pressões médias na base, vazão 7,1 l/s | 64 |
| Figura 30 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 23,0 l/s | 64 |
| Figura 31 - Comportamento das flutuações de pressões na base, abertura 30%..... | 65 |
| Figura 32 - Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura 50%..... | 65 |
| Figura 33 - Comportamento das flutuações de pressões na base, vazão 7,1 l/s | 66 |
| Figura 34 - Comportamento das flutuações de pressões na base, vazão 31,8 l/s | 66 |
| Figura 35 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30% | 68 |
| Figura 36 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 50% | 68 |
| Figura 37 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 7,1 L.s ⁻¹ | 69 |
| Figura 38 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 31,8 L.s ⁻¹ | 69 |
| Figura 39 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura 30% | 71 |
| Figura 40 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura 50% | 71 |
| Figura 41 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 7,1 l/s | 72 |
| Figura 42 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 31,8 l/s | 72 |
| Figura 43 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 10% | 76 |
| Figura 44 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 40% | 76 |
| Figura 45 - Relação entre os coeficientes da Equação 13 e o grau de abertura da comporta, (a) coeficiente A, (b) coeficiente B, (c) coeficiente C, (d) coeficiente D e (e) coeficiente E | 78 |
| Figura 46 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 10%..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 47 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 40%..... | 81 |
| Figura 48 - Relação entre os coeficientes da Equação 16 e o grau de abertura da comporta, (a) coeficiente a, (b) coeficiente b, (c) coeficiente c e (d) coeficiente d | 83 |
| Figura 49 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 10%..... | 85 |
| Figura 50 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 30% | 85 |
| Figura 51 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 10% .. | 85 |
| Figura 52 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 30% .. | 85 |
| Figura 53 - Relação entre os coeficientes da Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficiente adimensionais de posição ($x/D > 4$) e o coeficiente $N_{0,1\%}$ e o grau de abertura da comporta (a) coeficiente F, (b) coeficiente G e (c) coeficiente H | 88 |
| Figura 54 - Relação entre os coeficientes da Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficiente adimensionais de posição ($x/D > 4$) e o coeficiente $N_{1\%}$ e o grau de abertura da comporta (a) coeficiente F, (b) coeficiente G e (c) coeficiente H..... | 89 |
| Figura 55 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 10% .. | 90 |
| Figura 56 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 30% | 90 |
| Figura 57 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 10% | 90 |
| Figura 58 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 30% | 90 |
| Figura 59 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10% | 92 |
| Figura 60 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40% | 93 |
| Figura 61 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10%..... | 95 |
| Figura 62 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40%..... | 95 |
| Figura 63 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS..... | 96 |
| Figura 64 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS..... | 96 |
| Figura 65 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS..... | 97 |
| Figura 66 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS..... | 97 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Faixa de operação dos transdutores da base do conduto..... | 52 |
| Tabela 2 - Vazões ensaiadas, número de Froude e Reynolds..... | 54 |
| Tabela 3 - Vazões correspondentes modelos UFPel e UFRGS..... | 56 |
| Tabela 3 – Expoente α_{med} para a Equação 12 | 75 |
| Tabela 5 - Coeficientes para a Equação 13 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto ... | 77 |
| Tabela 5 - Expoentes α_{flu} para a Equação 14..... | 80 |
| Tabela 6 – Coeficientes para a Equação 16 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto ... | 82 |
| Tabela 7 - Coeficientes para a Equação 17 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade de 0,1% para a base do conduto | 86 |
| Tabela 8 Coeficientes para a Equação 17 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade de 1,0% para a base do conduto | 87 |
| Tabela 10 – Expoentes para a Equação 14 | 94 |

Lista de Símbolos

| | |
|--------------------|---|
| a | Abertura da comporta (m) |
| C_c | Coeficiente de contração |
| C_d | Coeficiente de descarga |
| $C'P$ | Coeficiente de flutuação de pressão |
| D | Altura da seção transversal do conduto (m) |
| g | Aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$) |
| H_t | Perda de carga |
| L_j | Comprimento do ressalto livre |
| L_r | Comprimento do rolo |
| L_{sj} | Comprimento do ressalto afogado |
| N | Coeficiente estatístico e característico de distribuição de probabilidades |
| $N_{0,1\%}$ | Coeficiente estatístico e característico associado à probabilidade de não-excedência de 0,1% |
| $N_{1,0\%}$ | Coeficiente estatístico e característico associado à probabilidade de não-excedência de 1,0% |
| $N_{99,0\%}$ | Coeficiente estatístico e característico associado à probabilidade de não-excedência de 99,0% |
| $N_{99,9\%}$ | Coeficiente estatístico e característico associado à probabilidade de não-excedência de 99,9% |
| n^* | Coeficiente de forma para ressalto hidráulico em condutos forçados |
| L_{adm} | Coeficiente de posição Posição dos pontos de medição, a partir do terminal da comport |
| P_{adm} | coeficiente adimensional de pressão média |
| P_x | Pressão média |
| $P_{x\%}$ | Pressões com determinada probabilidade de não-excedência |
| $P_{0,1\%}$ | Pressão com probabilidade de 0,1% de não-excedência |
| $P_{1\%}$ | Pressão com probabilidade de 1% de não-excedência |
| $P_{99\%}$ | Pressão com probabilidade de 99% de não-excedência |
| $P_{0,1\%}$ | Pressão com probabilidade de 99,9% de não-excedência |
| \bar{P} | Pressão média no ponto de medição para determinado grau de abertura da comporta |
| $\bar{P}_{a100\%}$ | Pressão média no ponto de medição para a mesma condição de vazão a \bar{P} e 100% de abertura da comporta |
| Q | Vazão ($m^3.s^{-1}$) |
| SD | Flutuação de pressão |
| T_w | Altura d'água na saída do ressalto hidráulico submerso ou afogado (m) |
| v | Velocidade média na seção da comporta ($m.s^{-1}$) |
| V_1 | Velocidade na seção da altura conjugada rápida ($m.s^{-1}$) |
| V_2 | Velocidade na seção da altura conjugada lenta ($m.s^{-1}$) |
| V_{vc} | Velocidade na seção da <i>vena contracta</i> |
| V_a | Velocidade média na seção da comporta |

| | |
|---------------------------|---|
| V_D | Velocidade média no conduto |
| X | Posição de início do ressalto (m) |
| X_{adm} | Coeficiente adimensional de posição |
| x_i | Posição dos pontos de medição (m) |
| y_1 | Profundidade da água a montante da comporta (m) |
| y_2 | Profundidade da água a jusante da comporta (m) |
| Y_3 | Lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto (m) |
| Y_L^* | Altura conjugada lenta equivalente (m) |
| Y_L | Altura conjugada lenta (m) |
| Y_R | Altura conjugada rápida (m) |
| Y_{vc} | Profundidade da água na seção da <i>vena contracta</i> (m) |
| α_{flu} | Expoente para o adimensional de flutuação de pressão |
| α_{med} | Expoente para o adimensional de pressão média |
| β | Coeficiente de aeração |
| β_3 | Ângulo que o terminal da comporta forma com a base do conduto |
| σ_{adm} | Coeficiente adimensional de flutuação de pressão |
| σ_x | Flutuações de pressão (mm.c.a.) |
| $\frac{P}{\gamma}$ | Carga de pressão média no ponto de medição (mm.c.a.) |
| $\frac{\sigma_x}{\gamma}$ | Carga de flutuação de pressão (mm.c.a.) |

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 19 |
| 1.1 Objetivos | 21 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 21 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 21 |
| 1.2 Hipótese | 21 |
| 2. Revisão da Literatura | 22 |
| 2.1 Comportas Hidráulicas | 22 |
| 2.2 Escoamento sob comportas | 24 |
| 2.2.1 Escoamento a jusante de comportas em eclusas | 29 |
| 2.2.2 Escoamento a jusante de comportas em vertedouros | 31 |
| 2.2.3 Escoamento a jusante de comportas em descarregadores de fundo | 31 |
| 2.2.4 Escoamento a jusante de comportas em canais de irrigação | 33 |
| 2.3 Ressalto Hidráulico a Jusante de Comportas | 33 |
| 2.4 Forças Hidrodinâmicas | 39 |
| 2.5 Estudo das pressões a jusante de comportas | 40 |
| 3. Metodologia | 45 |
| 3.1 Instalação Experimental | 45 |
| 3.2 Grandezas Físicas e Instrumentação Utilizada | 51 |
| 3.2.1 Pressões Médias | 51 |
| 3.2.2 Pressões flutuantes | 51 |
| 3.2.3 Grau de abertura da comporta | 53 |
| 3.2.4 Vazão | 54 |
| 3.2.5 Níveis de água | 54 |
| 3.3 Condição de ensaio | 55 |
| 3.4 Modelo físico hidráulico IPH - UFRGS | 56 |
| 3.5 Metodologia analítica | 59 |
| 3.5.1 Consistência dos dados | 59 |
| 3.5.2 Análise estatística | 59 |
| 3.5.3 Pressões Médias (P_x), Flutuação de pressão (σ_x) e Pressões extremas ($P_{x\%}$) | 60 |
| 3.5.4 Coeficiente estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) | 61 |

| | |
|---|-----|
| 4. Resultados e Discussão | 62 |
| 4.1 Comportamento das Pressões Médias | 62 |
| 4.2 Comportamento das Pressões Flutuantes | 64 |
| 4.3 Comportamento das Pressões Extremas..... | 67 |
| 4.4 Adimensional de pressões médias..... | 73 |
| 4.5 Adimensional de pressão flutuante | 79 |
| 4.6 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) | 84 |
| 4.6.1 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) para pressões mínimas 0,1% e 1,0% | 84 |
| 4.6.2 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) para pressões máximas 99,0% e 99,9% | 89 |
| 4.7 Verificação dos adimensionais e ajustes propostos com dados de outro modelo | 91 |
| 4.7.1 Verificação do ajuste dos adimensionais de pressão média | 91 |
| 4.7.2 Verificação do ajuste dos adimensionais de flutuação de pressão | 93 |
| 4.7.3 Verificação do ajuste dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades | 96 |
| 6. Recomendações | 101 |
| Referências | 102 |
| Apêndices..... | 108 |
| Apêndice A - Comportamento das pressões médias por abertura..... | 109 |
| Apêndice B - Comportamento das pressões médias na base por vazão..... | 112 |
| Apêndice C - Comportamento das flutuações de pressões na base por abertura | 116 |
| Apêndice D - Comportamento das flutuações de pressão na base por vazão..... | 119 |
| Apêndice E - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base por abertura..... | 123 |
| Apêndice F - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base por vazão | 126 |
| Apêndice G - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base por abertura..... | 130 |
| Apêndice H - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base por vazão | 133 |
| Apêndice I - Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base por abertura..... | 137 |

| | |
|--|-----|
| Apêndice J - Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base por vazão | 140 |
| Apêndice K - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base por abertura..... | 144 |
| Apêndice L - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base por vazão | 147 |
| Apêndice M – Adimensional de pressão média | 151 |
| Apêndice N – Adimensional de pressão flutuante..... | 154 |
| Apêndice O – Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N0,1%... | 157 |
| Apêndice P - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N1,0% | 159 |
| Apêndice Q - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N99,0%.. | 161 |
| Apêndice R - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N99,9%.. | 163 |
| Apêndice S – Verificação dos adimensionais de pressão média | 165 |
| Apêndice T - Verificação do ajuste adimensional de flutuação de pressão | 167 |
| Apêndice U - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS | 169 |
| Apêndice V – Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS | 172 |

1 Introdução

A complexidade dos processos e fenômenos físicos que envolvem os sistemas hidráulicos traz a necessidade de estudos em modelos físicos hidráulicos, anteriores a implantação de estruturas hidráulicas. Os modelos físicos permitem o estudo dos fenômenos hidráulicos que ocorrem em uma estrutura real (protótipo), identificando suas características, os problemas que podem estar associados e possíveis soluções para evitar que ocorram danos às estruturas, e conseqüentemente, projetando estruturas mais seguras e, se possível, com custos reduzidos.

As estruturas a jusante de comportas hidráulicas sofrem ação dos esforços hidrodinâmicos, sendo que uma das formas de identifica-los é através de modelos reduzidos de comportas, que permite a medição de grandezas físicas em modelos com escala reduzida. As comportas hidráulicas são dispositivos hidromecânicos utilizados para controlar o fluxo em estruturas hidráulicas, sendo bastante usuais em sistema de enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação, em descarregadores de fundo de barragens, em sistemas de irrigação e em controles diversos de escoamento.

O estudo em modelos reduzidos de eclusas de navegação cresceu juntamente com o desenvolvimento do setor de transporte aquaviário, a fim de viabilizar a navegação fluvial interior, que muitas vezes apresenta obstáculos à navegação.

Conforme USACE (2006), os modelos experimentais em escala reduzida têm melhorado significativamente a eficiência dos sistemas de enchimento e esvaziamento de eclusas. Por este motivo, eles têm sido utilizados extensivamente, tanto na fase de projeto como para analisar problemas específicos em eclusas já construídas ou para desenvolver critérios de previsão de esforços atuantes.

O escoamento a jusante de comportas em qualquer estrutura hidráulica geralmente é altamente turbulento e complexo, devido a ocorrência de altas velocidades e bruscas variações de pressões nesta região, podendo desencadear processos erosivos a partir de cavitação. O fenômeno de erosão/cavitação impacta negativamente as estruturas hidráulicas, devido ao desgaste por erosão das superfícies sólidas, que é consequência do colapso ou implosão das bolhas de ar, acompanhadas de ruídos e vibrações.

O escoamento a jusante de comporta assemelha-se ao que ocorre em ressalto hidráulico submerso confinado, por ser um fenômeno altamente dissipativo e pela

ocorrência da região de recirculação (rolo), porém as alturas conjugadas são limitadas pelo diâmetro do conduto.

A justificativa desta pesquisa está sedimentada na necessidade de encontrar alternativas técnicas para minimizar os esforços hidrodinâmicos evitando danos as estruturas hidráulicas, buscando identificar e prever regiões onde ocorram as pressões extremas e os seus valores na base de um conduto a jusante de comportas, visando apresentar informações para aumentar a eficiência e a segurança destes sistemas.

Esta pesquisa aborda as pressões que ocorrem na base de um conduto a jusante de comporta, porém as pressões que atuam no teto também são pressões extremas como constataram Palauro (2012), Dalla Corte (2013), Battiston (2013), Kempka (2014), Dutra (2014) e Abreu (2015).

A dissertação está organizada em 5 itens. No presente item, de caráter introdutório, é exposto o problema e apresentado os objetivos e a hipótese da dissertação. A seguir, no item 2, está apresentada a revisão bibliográfica referente ao escoamento a jusante de comportas. No item 3 são descritas a instalação experimental e a metodologia utilizada na realização nos ensaios e a metodologia analítica. Os resultados e discussão dos ensaios são apresentados no item 4, onde está apresentado o comportamento das pressões médias, flutuantes e extremas ao longo da base do conduto a jusante de comporta e os adimensionais propostos nesta pesquisa. O item 5 contém as conclusões do trabalho e o item 6 as recomendações e sugestões para a continuidade da pesquisa. Por fim, estão listadas as referências bibliográficas utilizadas nesta pesquisa e os Apêndices que apresentam alguns resultados gráficos.

A presente pesquisa faz parte do projeto "ANÁLISE DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS A JUSANTE DE VÁLVULAS DE SISTEMAS DE ENCHIMENTO/ESVAZIAMENTO DE ECLUSAS DE NAVEGAÇÃO", financiado pela FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é caracterizar as pressões induzidas na base pelo escoamento a jusante de comportas em condutos retangulares criando um método de previsão de pressões extremas para base com distintas probabilidades de ocorrências a partir de parâmetros adimensionais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a distribuição longitudinal das pressões médias, flutuantes e extremas verificadas experimentalmente junto à base do conduto a jusante da comporta;
- Avaliação dos esforços de pressão sob diferentes condições de vazão e abertura da comporta;
- Desenvolvimento de uma metodologia de previsão de pressões extremas com distintas probabilidades de ocorrência;
- Verificar os parâmetros adimensionais propostos nesta pesquisa através dos dados experimentais obtidos no modelo físico instalado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1.2 Hipótese

As pressões com distintas probabilidades de ocorrência são caracterizadas apenas pela pressão média e pela flutuação de pressão ponderada por um coeficiente característico representativo da probabilidade de ocorrência, de forma análoga ao verificado em ressaltos hidráulicos.

2. Revisão da Literatura

Neste item é abordado o estado da arte referente ao escoamento a jusante de comportas, permitindo o embasamento teórico dos temas relacionados à pesquisa.

2.1 Comportas Hidráulicas

As comportas hidráulicas são dispositivos hidromecânicos utilizados para controlar o fluxo em estruturas hidráulicas. Segundo Erbiste (1987), a construção de comportas hidráulicas originou-se da necessidade de controlar a vazão da água em instalações de irrigação, abastecimento d'água e também na navegação fluvial.

Atualmente as comportas são muito utilizadas no campo da engenharia hidráulica, geralmente para regulação de vazões ou níveis d'água em eclusas, em descarregadores de fundo, em canais de irrigação, em tomadas d'água, em vertedouros e também para a manutenção e limpeza de reservatórios e sistemas hidráulicos em geral.

A Norma Brasileira NBR 7259/92 classifica as comportas quanto sua movimentação e funcionamento e também define os tipos de comportas quanto a sua terminologia em: gaveta, ensecadeira, vagão, lagarta, *Stoney*, segmento, setor, tambor, basculante, rolante, cilíndrica, mitra, telhado, visor, mista e múltipla.

Existem muitos tipos de comportas, porém, com o decorrer do tempo os frequentemente utilizados em estruturas hidráulicas foram reduzidas à alguns tipos como: segmento (Figura 1a), plana (Figura 1b), basculante (Figura 1c), setor (Figura 1d) e tambor (Schreiber, 1977).

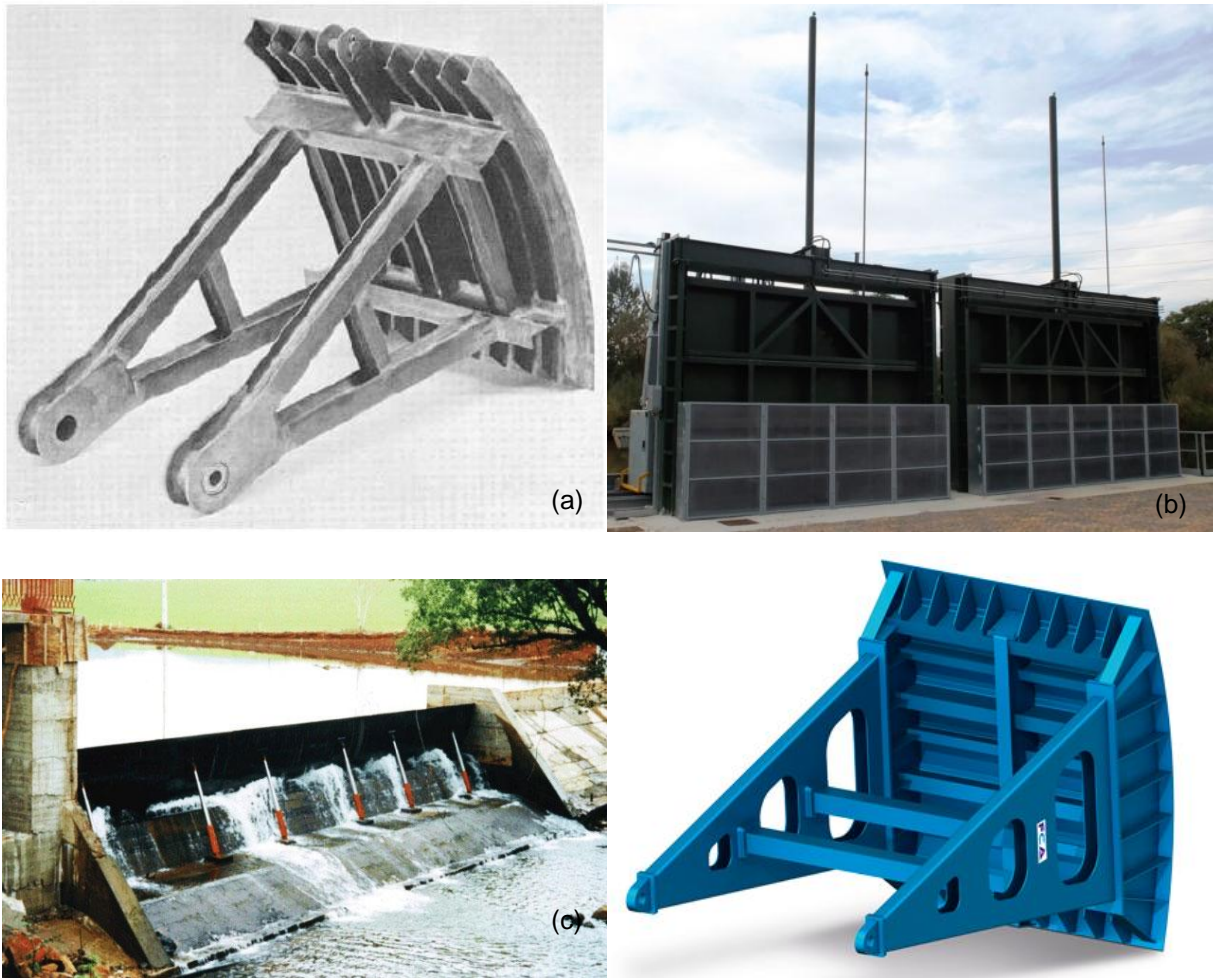


Figura 1 - Comportas hidráulicas (a) segmento, (b) plana, (c) basculante, (d) setor. Fonte: USSACE (2011); BIANCO (2016); HACKER (2016); FCA (2016).

A comporta de segmento é o tipo mais utilizado no Brasil em vertedouros e eclusas (Schreiber, 1977). Conforme Erbiste (1987), as primeiras comportas de segmento utilizadas em eclusas foram instaladas na posição convencional, com a face convexa da comporta instalada contra o escoamento e os braços de sustentação submetidos a compressão, mas os resultados de testes em modelos reduzidos mostraram a entrada de grande quantidade de ar no aqueduto através do poço da comporta, e conseqüentemente, excessiva turbulência. A solução para este problema foi a implantação da comporta de segmento instalada na posição invertida, com os braços solicitados à tração e o lado côncavo do paramento posicionado a montante do escoamento (USACE, 1975).

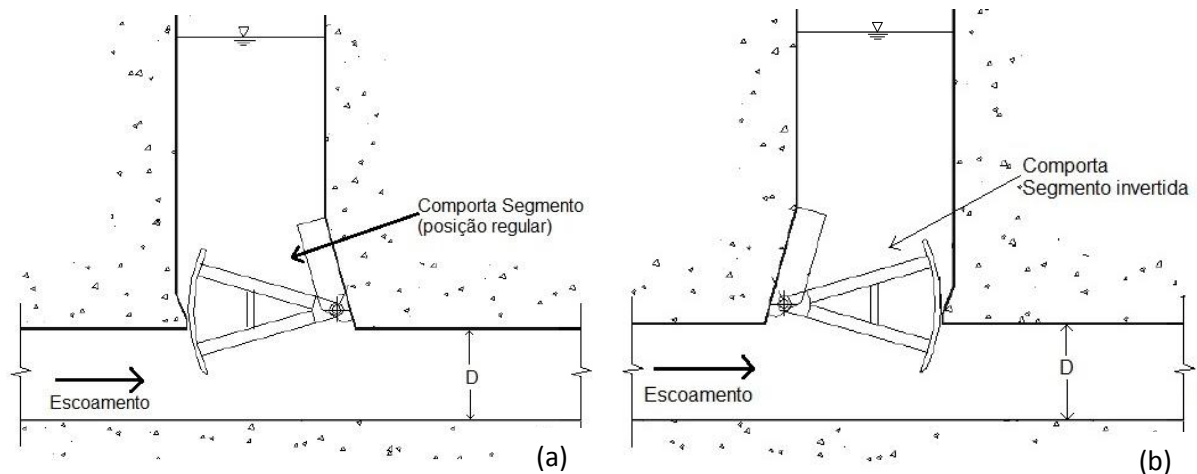


Figura 2 - Desenho esquemático da instalação de (a) comporta segmento e (b) comporta segmento invertida. Fonte: adaptado de USACE, 2011.

As comportas planas de translação do tipo gaveta, em virtude do seu funcionamento simples e que exige pouca manutenção, é um tipo de comporta muito utilizada como dispositivo de controle de vazão em canais de irrigação, decantadores, obras de saneamento, descargas de fundo e tomadas d'água. O seu funcionamento consiste em uma tabuleiro que desliza dentro de guias laterais embutidas ou aparafusadas no concreto (Erbiste, 1987).

Santos (1998), indica algumas questões fundamentais relativas as comportas de controle de fluxo:

- Vibração em função das flutuações de pressão a jusante das comportas;
- Esforços espasmódicos na aparelhagem de movimentação;
- Ampliação de esforços ligados aos fenômenos de *downpull* e *uplift*;
- Cavitação.

2.2 Escoamento sob comportas

O escoamento sob comportas pode ser considerado com os mesmos princípios de um escoamento que ocorre a jusante de orifícios (Neves, 1960), devido a ocorrência de uma contração no fluxo, o que torna a seção útil do escoamento menor e, conseqüentemente, aumenta as velocidades. Este fenômeno é conhecido como "*vena contracta*" (Figura 3).

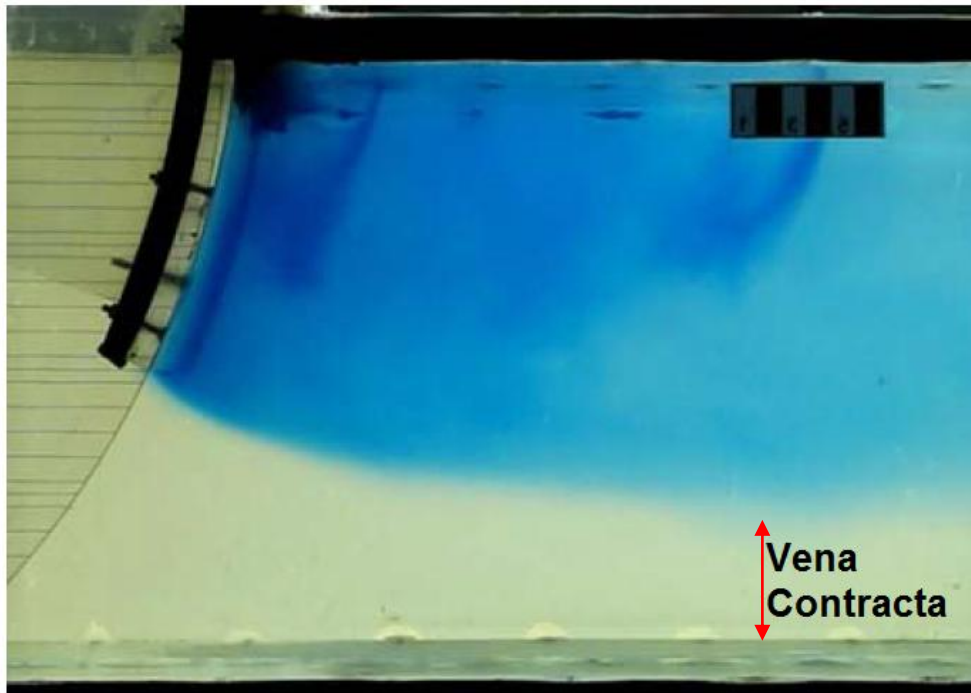


Figura 3 - Visualização da *vena contracta*. Fonte: Adaptado de Palauro (2014).

A relação entre a lâmina de água na seção da *vena contracta* (Y_{vc}) e a abertura da comporta (a) é chamada de coeficiente de contração (C_c), ou seja, é o grau de contração do escoamento a jusante de uma comporta, conforme a Equação 1 e a Figura 4 (Lin et al., 2002).

$$C_c = \frac{Y_{vc}}{a}$$

Equação 1

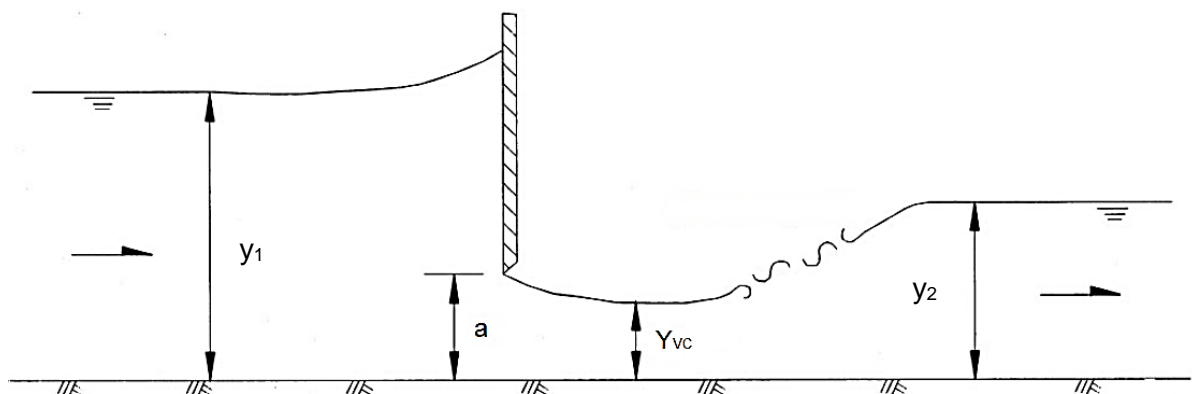


Figura 4 - Escoamento livre a jusante de comporta Fonte: Adaptado de Lin et al., (2002).

A *vena contracta* representa o ponto de menor pressão e maior velocidade, ocorrendo perda de carga devido ao atrito nas camadas limites. A jusante da *vena*

contracta a energia cinética volta a se converter em energia potencial (Battiston, 2009; Belaud et al., 2009).

Em comportas segmento há uma grande dificuldade na determinação da vazão que passa pela comporta, devido à complexidade na determinação do coeficiente de contração.

Para a comporta segmento invertida, o coeficiente de contração do escoamento é muito sensível, pois varia em função da geometria do terminal da comporta e do ângulo que ele forma com a base do conduto (β_3), o qual varia de acordo com a abertura da comporta. Alguns valores podem ser visualizados na Figura 5, conforme Kempka (2014).

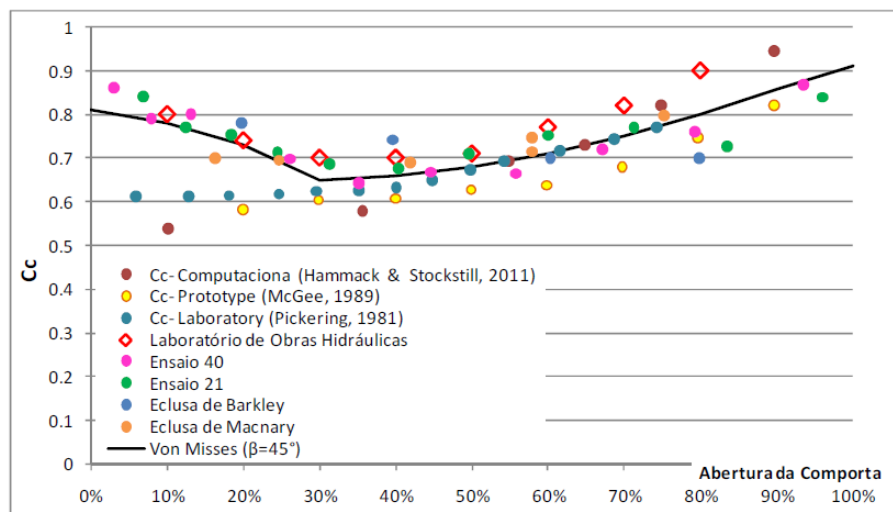


Figura 5 - Coeficiente de contração para comporta invertida para diferentes autores¹. Fonte: Kempka, 2014.

Já para comportas de fundo verticais e inclinadas, Mohammed e Khaleel (2013), verificaram a partir de resultados experimentais que o coeficiente de contração aumenta quando a inclinação da comporta aumenta na direção do escoamento e diminui se a inclinação da comporta for oposta à direção do escoamento. Em relação a geometria da borda da comporta o coeficiente de contração é maior para a borda horizontal do que para a borda com aresta inclinada.

Conforme a condição hidráulica de jusante, o escoamento a jusante da comporta pode ser livre (Figura 6a), em geral seguido de ressalto hidráulico, ou afogado (Figura 6b), conforme Porto (2006). Quando as aberturas da comporta são

¹Os ensaios denominados Ensaio 21 e Ensaio 40 são citados por Ussami (1980) e, no texto, não fica claro qual autor produziu o dados, da mesma forma para Eclusa de Barkley e Eclusa de Macnary.

grandes, a perda de carga através desta é pequena e o fluxo é em grande parte submerso (Belaud et al., 2009).

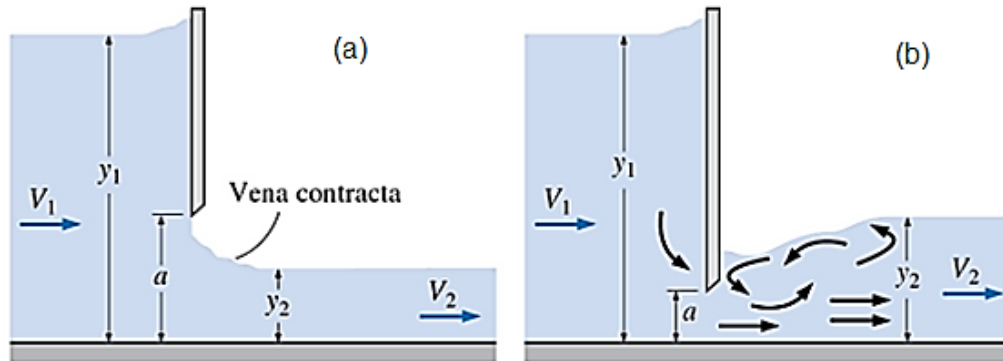


Figura 6 - Escoamento a jusante de comporta (a) livre e (b) afogado. Fonte: adaptado de Çengel & Cimbala (2007).

Segundo Lin et al. (2002), as comportas que tiverem o coeficiente de contração maior terão menos suscetibilidade de submersão, uma vez que a ocorrência do escoamento submerso está relacionada com o coeficiente de contração e a formação do ressalto hidráulico a jusante da comporta está relacionada com a profundidade da água na *vena contracta*

A determinação da vazão escoada por uma comporta pode ser feita através das equações de energia e de continuidade, entre duas seções com alturas d'água uniformes (distribuição de pressão hidrostática). Conforme Porto (2006), considerando o escoamento livre a jusante e desprezando as perdas de carga entre a seção da *vena contracta* e da seção 2 (Figura 7), pode-se escrever:

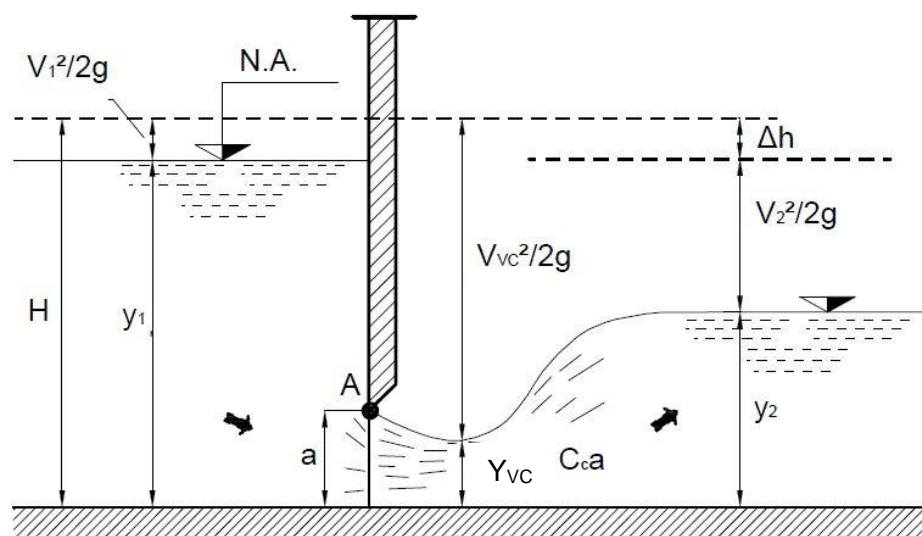


Figura 7 - Escoamento a jusante de comporta

$$H = y_1 + \frac{Q^2}{2gy_1^2} = Y_{VC} + \frac{Q^2}{2gY_{VC}^2}$$

Equação 2

Que desenvolvida fica:

$$Q = y_1 \cdot Y_{VC} \cdot \sqrt{\frac{2g}{y_1 + Y_{VC}}}$$

Equação 3

Considerando que $Y_{VC} = C_c \cdot a$:

$$Q = C_c \cdot a \cdot \sqrt{2gy_1 \cdot \frac{y_1}{Y_1 + C_c \cdot a}}$$

Equação 4

Fazendo:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c \cdot a}{y_1}}}$$

Equação 5

Resultando na Equação 6 para cálculo da vazão sob a comporta:

$$Q = C_d \cdot a \cdot \sqrt{2gy_1}$$

Equação 6

Onde:

Q = vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

a = abertura da comporta (m)

y_1 = profundidade da água a montante da comporta (m)

Y_{VC} = profundidade da água na *vena contracta* (m)

g = aceleração da gravidade (m s^{-2})

C_d = coeficiente de descarga

C_c = coeficiente de contração

O coeficiente de descarga depende da geometria da comporta, da estrutura em que a comporta está instalada e da profundidade de montante e de jusante, a qual condiciona o escoamento em livre ou submerso (USACE, 1977; CHOW, 1959). Este coeficiente tem sido estudado por pesquisadores, através de modelos experimentais como Henry (1950), que estudou a difusão do jato submerso a jusante de uma comporta normal e desenvolveu um gráfico para determinação do coeficiente de descarga para condições de escoamento livre e submerso, sendo confirmado por Rajaratnam e Subramanya (1967). Com base nos gráficos desenvolvidos por Henry (1950), Swamee (1992) desenvolveu equações para condições de escoamento livre e submerso e também a condição para existência de descarga livre e/ou submersa.

Observa-se nas comportas que são instaladas em condutos e que não descarregam diretamente na atmosfera, o aparecimento de depressões a jusante da comporta, que depende da vazão, do grau de abertura da comporta e da geometria de instalação, sendo capaz de apresentar grandes inconvenientes à operação da comporta e à segurança do equipamento, em virtude do aparecimento de vibrações e cavitação (Erbiste, 1987).

Conforme Erbiste (1987), uma alternativa para a minimização ou desaparecimento das depressões é a instalação de tubos de aeração que possibilitam a entrada de ar durante o esvaziamento do conduto e o escapamento de ar durante o enchimento do conduto.

2.2.1 Escoamento a jusante de comportas em eclusas

As eclusas são instalações essenciais para o desenvolvimento do setor hidroviário no país, pois permitem a navegação em trechos de hidrovias, os quais são barrados por usinas hidrelétricas ou que apresentem obstáculos naturais à navegação (BRASIL, 2010).

As eclusas permitem a transposição de nível das embarcações através do enchimento e esvaziamento da câmara, local onde as embarcações são atracadas. Para controlar o nível e a vazão do sistema de enchimento e esvaziamento são utilizadas comportas (Figura 8).

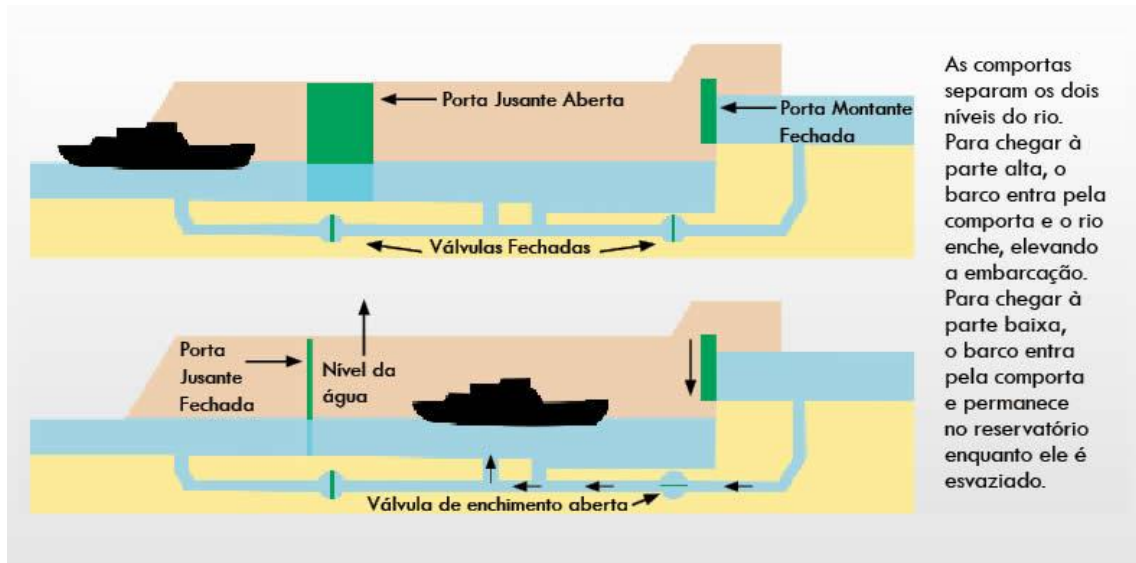


Figura 8 - Funcionamento de uma eclusa. Fonte: <http://quaradouro.blogspot.com.br/2010/11/eclusas-o-fim-de-uma-longa-espera.html>

A operação de uma eclusa é complexa, pois apresenta uma série de limitações devido aos esforços hidráulicos a que são submetidas, os quais muitas vezes são nocivos tanto à estrutura quanto à embarcação. A grande diferença de pressões entre as faces da comporta e o curto período de tempo exigido para as operações de eclusagem incidem em altas velocidades, elevadas flutuações de pressão e grandes perdas de carga no escoamento junto às comportas (Dalla Corte et al., 2012).

As maiores dificuldades no projeto e na operação das eclusas são: agitação da superfície da linha d'água no interior da câmara, quantificação dos esforços nas amarras, as altas quedas necessárias, que proporcionam altas velocidades no interior dos condutos, queda brusca da pressão média e amplas flutuações de pressão a jusante das comportas, favorecendo o fenômeno de erosão e/ou cavitação (Kempka, 2014; Santos, 1998).

Para amenizar os efeitos causados pelas pressões negativas e eliminar os efeitos de erosão e/ou cavitação que ocorre nos aquedutos são utilizados revestimentos mais resistentes na região, leis de manobra especiais para as comportas, alteração geométrica na seção do conduto a jusante da comporta e a introdução de ar nos condutos.

Erbiste (1987), enfatiza a importância da aeração em condutos equipados com comportas, pois a pressão a jusante das comportas pode chegar a nível subatmosférico. Entretanto, nos sistemas de eclusas este procedimento é bastante limitado, pois quando o ar é expelido dentro da câmara, ocasiona perturbações na superfície de água que podem provocar acidentes com as embarcações (Lopes et al.,

2010; Santos et al., 2012). Desta forma, a adição de ar imediatamente a jusante das comportas de eclusas deve ser controlada e limitada, o que segundo Santos (1998) vem sendo realizada com sucesso em várias eclusas de alta queda, provocando não apenas o aumento da pressão média, como também diminuindo o valor dos picos dos pulsos de pressão instantânea negativa.

2.2.2 Escoamento a jusante de comportas em vertedouros

A utilização de comportas em barramentos é importante para otimizar a estrutura vertente, uma vez que a operação pode ser iniciada com a carga elevada em relação à crista permitindo a passagem da vazão de projeto num menor comprimento de vertedor (Arauz, 2005). Porém, a implantação de comportas pode gerar a ocorrência de vórtices junto ao paramento de montante da comporta, onde segundo Arauz (2005), dependendo da intensidade dos vórtices, pode ocorrer o arraste de ar junto à região do núcleo e a vibração da comporta, além da possibilidade de ocorrência de pressões negativas junto à soleira e imediatamente a jusante da comporta.

2.2.3 Escoamento a jusante de comportas em descarregadores de fundo

O descarregador de fundo é uma estrutura hidráulica utilizada na fase de construção de uma barragem para desviar o curso d'água e após a implantação da barragem permite a operação do reservatório, caso necessite esvazia-lo parcial ou totalmente. Também é utilizado em uma barragem para manter uma vazão a jusante, independente da vazão turbinada, para abastecimento, irrigação, água de compensação, ou outros usos (Eletrobrás, 2003). Os descarregadores de fundo podem ter outras finalidades, e, dependendo do seu uso é necessário a instalação de comportas para o controle da vazão.

A operação das comportas em descarregadores de fundo acaba favorecendo a erosão/cavitação, como é o caso do Aproveitamento Hidrelétrico de Cambambe, que encontra-se no principal rio da Angola. De acordo com Palu et al. (2010), após 50 anos da sua construção, em uma inspeção no descarregador de fundo, foi encontrado

um processo de erosão por cavitação em grandes proporções a jusante de uma comporta segmento (Figura 9).

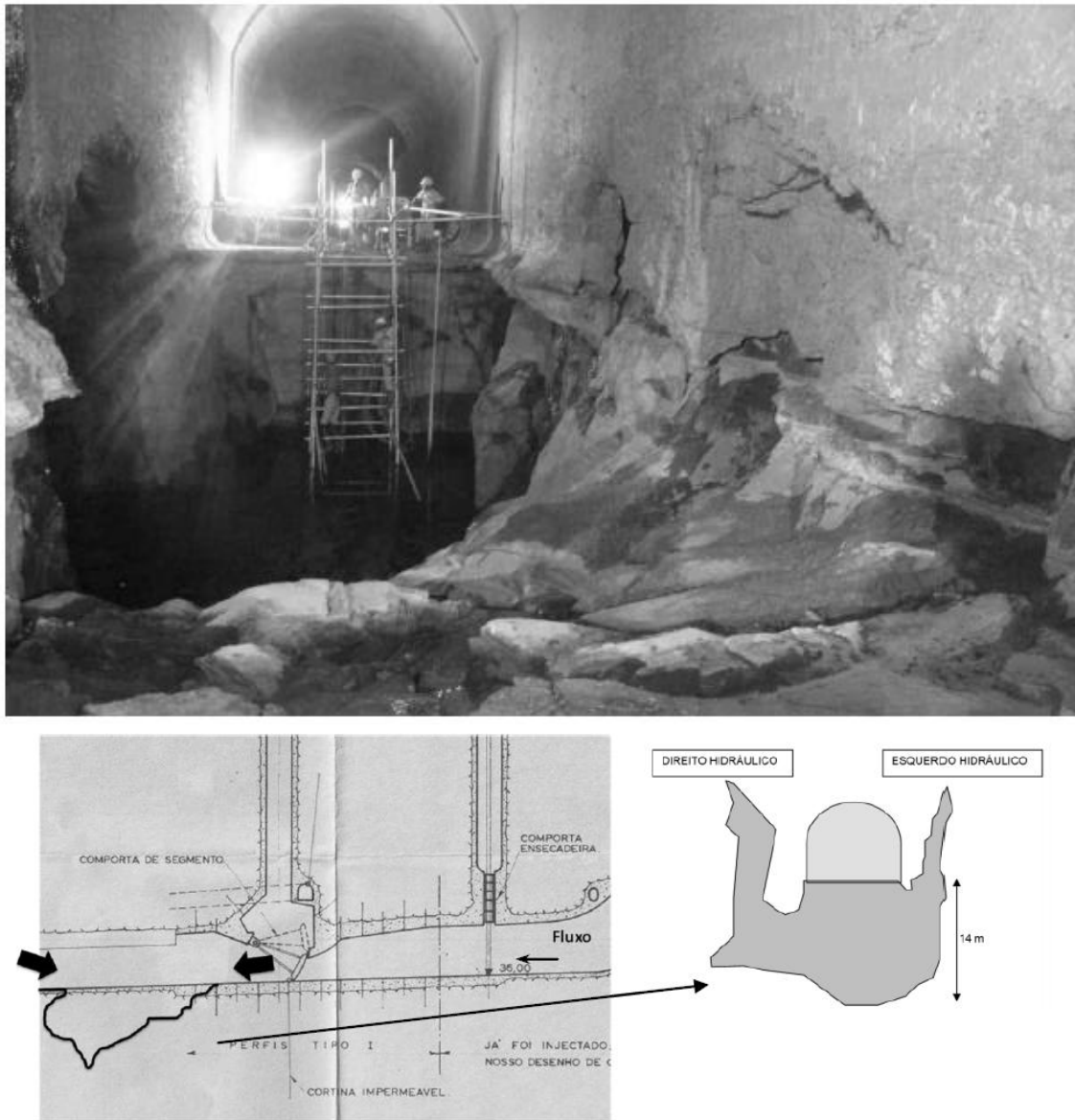


Figura 9 - Processo de erosão por cavitação em grandes proporções a jusante de uma comporta segmento em um descarregador de fundo. Fonte: Palu et al., 2010

Com base na bibliografia e estudos realizados em modelo reduzido, Palu et al. (2010), propuseram a instalação de três aeradores, visto que com a aeração os efeitos da ação erosiva da cavitação diminuem.

2.2.4 Escoamento a jusante de comportas em canais de irrigação

A distribuição da quantidade certa de água em sistemas irrigados é um grande problema relacionado à condução de água em canais de irrigação (Amaral, 2010). Normalmente a regulação da vazão distribuída para o usuário é feita através de comportas, variando o nível de água. A regulação da vazão pode ser manual, que torna a manutenção dos canais trabalhosa, ou então automatizada, o que facilita o manejo da água.

2.3 Ressalto Hidráulico a Jusante de Comportas

O ressalto hidráulico é o fenômeno que ocorre na transição de um escoamento supercrítico (rápido), com número de Froude maior que 1, para escoamento subcrítico (lento), com número de Froude menor que 1. O escoamento é caracterizado por um rápido aumento na profundidade d'água, acompanhada de uma instabilidade com ondulações e entrada de ar do ambiente e por uma consequente perda de carga devido à grande turbulência (Chow, 1959; Porto, 2006).

Em algumas estruturas hidráulicas este fenômeno é utilizado para dissipar energia cinética, porém este processo de dissipação está associado a pressões flutuantes macroturbuletas, que ocasionam efeito de arrancamento, fadiga, vibração e cavitação, podendo causar a destruição de estruturas hidráulicas (Lopardo, 1986).

A formação do ressalto hidráulico ocorre de acordo com as condições de contorno hidráulico e/ou geométricas a que o escoamento de entrada e/ou saída está submetido, podendo se formar a jusante de comportas em descargas de fundo, a jusante de vertedores e em dissipadores tipo salto esqui (Dai Prá, 2011).

Conforme Peterka (1974), o ressalto hidráulico pode ocorrer de quatro formas distintas a jusante de uma comporta (Figura 10), tendo como critério as condições hidráulicas na seção de entrada da comporta, as quais são representadas pelo número de Froude.

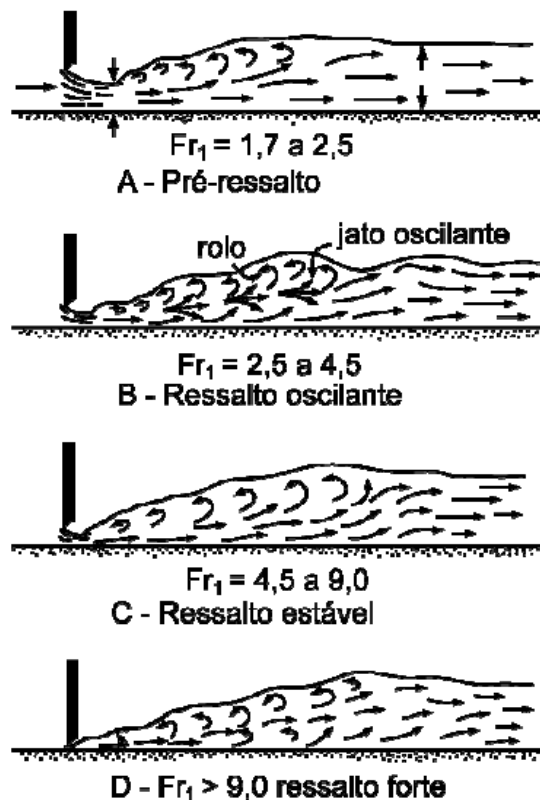


Figura 10 - Comportamento do ressalto hidráulico a jusante de comporta. Fonte: PETERKA, 1974.

Conforme Peterka (1974) os ressaltos representados na Figura 10 podem ser descritos como:

A - Pré-ressalto – $1,7 \leq Fr_1 < 2,5$ – escoamento caracterizado por pequenos rolos superficiais e dissipação de energia da ordem de 20% da energia de entrada.

B - Ressalto oscilante – $2,5 \leq Fr_1 < 4,5$ – apresenta um contorno nítido, com a formação de pulsações não periódicas que se propagam para jusante com amplitude aproximadamente constante. Apresenta dissipação de energia da ordem de 30% a 45%.

C - Ressalto estável – $4,5 \leq Fr_1 < 9,0$ – apresenta comportamento regular, de características externas estáveis e dissipação de energia entre 45% a 70%.

D - Ressalto forte – $Fr_1 > 9,0$ – apresenta intensa formação de vórtices e incorporação de ar, agitação da superfície e jatos de alta turbulência que se propagam por uma grande distância para jusante. A dissipação de energia pode atingir níveis de 85%.

Sharma (1976) apud Battiston (2013), classifica em seis tipos o escoamento a jusante de comportas em condutos horizontais, para o caso de comporta parcialmente aberta (Figura 11):

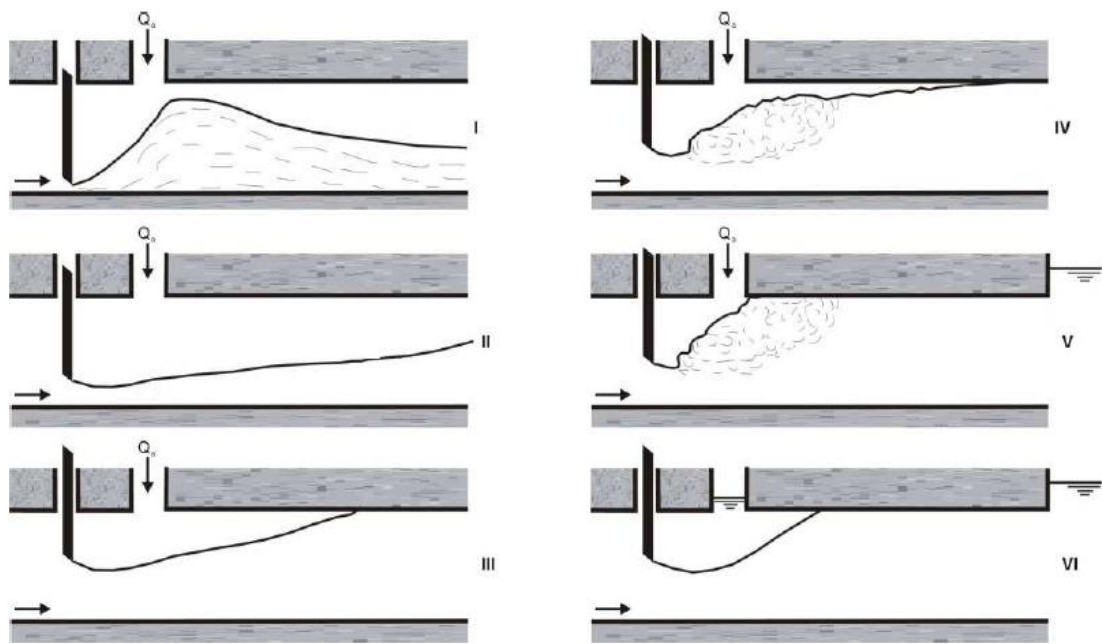


Figura 11 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos. Fonte: SHARMA, 1976 apud BATTISTON, 2013.

- I - Escoamento pulverizado;
- II - Escoamento com superfície livre;
- III - Escoamento com emulsão de ar;
- IV - Ressalto com superfície livre;
- V - Ressalto com escoamento em carga;
- VI - Ressalto afogado.

Os quatro primeiros tipos correspondem a escoamentos livres, com grande quantidade de ar incorporado. O escoamento tipo V apresenta um ressalto hidráulico com escoamento em carga, sendo que esta situação pode ocorrer no caso de descargas de fundo com saída afogada ou no caso de tomadas de água, durante o seu fechamento emergencial. O escoamento do tipo VI apresenta um ressalto hidráulico afogado, onde não há demanda de ar (Erbiste, 1987).

Bélanger (1828) a partir de deduções, verificou a condição para ocorrência do ressalto hidráulico e estabeleceu a Equação 7 que correlacionou as alturas conjugadas do ressalto hidráulico, a partir da conservação da quantidade de movimento entre a entrada e a saída do ressalto.

$$\frac{Y_L}{Y_R} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_R^2} - 1 \right)$$

Equação 7

Onde:

Y_R = altura conjugada rápida (m);

Y_L = altura conjugada lenta (m);

F_R = número de Froude do regime rápido (em Y_R), determinado pela Equação

8:

$$F_R = \frac{V_1}{\sqrt{gY_R}}$$

Equação 8

Onde:

V_1 = velocidade na seção da altura conjugada rápida (m s^{-1});

Y_R = lâmina do escoamento supercrítico, ou altura conjugada rápida (m);

g = aceleração devida à gravidade (m s^{-2}).

O ressalto hidráulico que ocorre em superfície livre é diferente do ressalto hidráulico que ocorre em condutos, devido a limitação da profundidade pelo diâmetro do conduto.

Haindl (1957a) estudou o ressalto hidráulico formado em um conduto devido à mudança de declividade. Mais tarde Rajaratnam (1965) apud Rajaratnam (1967) apresentou a Equação 9 para o ressalto hidráulico em condutos retangulares, parabólicos e triangulares:

$$\frac{Y_L^*}{Y_R} = \frac{\left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*} + n^* \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{2n^*+1} - \frac{n^*+1}{n^*} F_R^2 \left[1 + \beta - \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*}\right]}{(1 + n^*) \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*}}$$

Equação 9

Onde:

D = altura da seção transversal do conduto (m);

Y_L^* = altura conjugada lenta equivalente (m);

Y_R = altura conjugada rápida (m);

β = coeficiente aeração;

n^* = coeficiente de forma que vale 1 para condutos retangulares, 1,5 para condutos parabólicos e 2 para condutos triangulares.

De acordo com a Rajaratnam (1967) apud Battiston et al. (2009) a formação de ressalto hidráulico em condutos é observada a jusante de válvulas de controle e em tubulações, escoando parcialmente cheias, quando há uma transição de alta para baixa declividade.

Em conduto fechado, o início do escoamento a superfície livre é um escoamento supercrítico o qual muda para um escoamento pressurizado a jusante do ressalto, sendo a altura conjugada lenta confinada pelo teto do conduto (Negm, 2003), como pode ser visualizado na Figura 12.

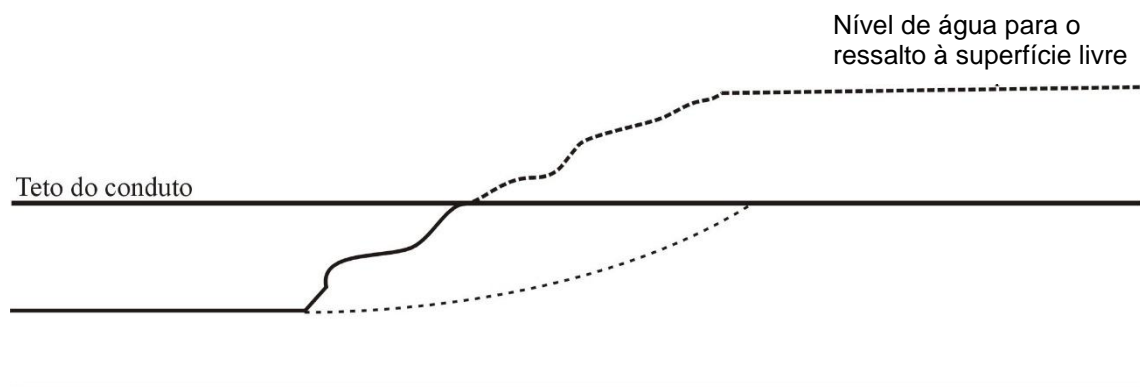


Figura 12 - Limitação da altura da lâmina de água pelo teto do conduto. Fonte: Smith & Chen, 1989 apud Battiston, 2009.

A jusante de comportas pode se formar ressaltos hidráulicos livres e submergidos, como pode ser visualizado na Figura 13. O ressalto hidráulico submergido se forma à medida que o nível de água a jusante torna-se maior que a altura conjugada lenta para um ressalto livre (Y_L). Segundo Lopardo et al. (2004), este tipo de ressalto pode ser considerado como uma condição intermediária entre o ressalto hidráulico livre e a difusão de um jato turbulento em um meio semi-infinito.

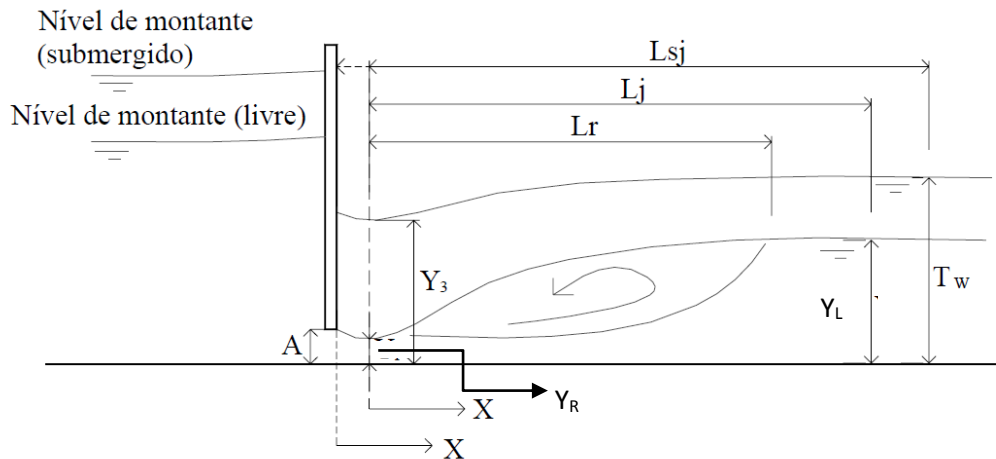


Figura 13 - Ressalto Hidráulico a jusante de comporta (Y_R = altura conjugada rápida, Y_L = altura conjugada lenta, Y_3 = lâmina mínima entre a comporta e o final do ressalto, L_r = comprimento do rolo, L_j = comprimento do ressalto livre, L_{sj} = comprimento do ressalto afogado e X = posição de início do ressalto, para o ressalto hidráulico livre considera-se a seção referente à altura conjugada Y_1 e para o ressalto submerso considera-se a posição da face de jusante da comporta). Fonte: adaptada de Trierweiler e Marques (2008).

Trierweiler (2006), propôs uma metodologia para previsão de valores de pressão com diferentes probabilidades em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta em canal aberto com diferentes graus de submergência.

A proposta da avaliação do escoamento a jusante de comportas em condutos enquanto analogia ao ressalto hidráulico afogado foi feita inicialmente por Haindl (1957b). Battiston et al. (2009) analisaram dados experimentais de pressões médias e instantâneas do escoamento para pequenas aberturas da comporta, comparando as características do escoamento do ressalto hidráulico a superfície livre com as do escoamento em questão, o qual foi tratado como um ressalto hidráulico em um conduto e concluíram que esta analogia pode ser feita.

Os problemas identificados, relacionados ao ressalto hidráulico, em estruturas hidráulicas têm como causa principal os efeitos do escoamento, responsável pelo desencadeamento e manutenção de processos de abrasão e erosão por cavitação, ou ainda pela ocorrência de sobrepressões e flutuações das pressões não suportadas pelas estruturas resultando em arrancamento de blocos estruturais e de rocha (Dai Prá, 2011).

2.4 Forças Hidrodinâmicas

Quando uma comporta está totalmente fechada e a água represada, em repouso, as pressões obedecem à lei hidrostática, mas com a comporta parcialmente aberta, o equilíbrio hidrostático é rompido, observando-se uma distribuição não uniforme da carga piezométrica no conduto junto à comporta. Isso se deve ao aparecimento de fluxo em alta velocidade na região do perfil inferior da comporta, ocasionando uma redução da pressão (Erbiste, 1987).

Os esforços hidrodinâmicos podem ser de abaixamento (*downpull*) e de levantamento (*uplift*), os quais são forças induzidas pelo escoamento nas superfícies das comportas (Erbiste, 1987). A força hidrodinâmica *downpull* é uma força vertical descendente, originada da diferença de pressões entre a face inferior e superior da comporta, já a força hidrodinâmica *uplift* é uma força vertical ascendente (Silva, 2011).

Knapp (1960) apud Erbiste (1987) estabeleceu que a formação das forças hidrodinâmicas em comportas está relacionada com a declividade acentuada na direção do movimento do escoamento em grandes velocidades. Ou seja, não há formação de forças hidrodinâmicas em comportas planas com paramento a montante (Figura 14a) e comportas de segmento, já em comportas planas com paramento a jusante (Figura 14b) ocorre o aparecimento de forças hidrodinâmicas.

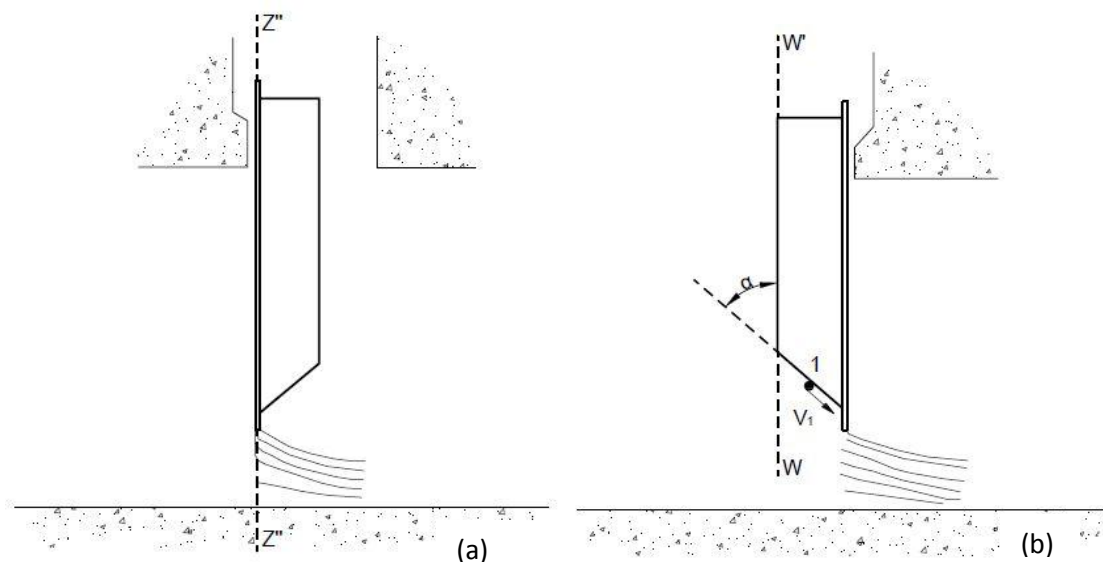


Figura 14 - Comporta plana (A) com paramento de montante (B) com paramento de jusante. Fonte: Adaptado de Erbiste, 1987.

Dados experimentais obtidos através de estudos em modelos hidráulicos demonstraram que o *downpull* é uma função da altura d'água e da área da seção horizontal da comporta, sendo afetado pela forma do perfil inferior da comporta, projeção da vedação superior, folgas entre a comporta e os frontais montante e jusante, espessura da comporta e recesso na parede vertical de jusante (Erbiste, 1987).

2.5 Estudo das pressões a jusante de comportas

As medições de pressões são importantes para aferição das perdas de cargas ao longo dos circuitos hidráulicos, para o projeto estrutural, pois dão informações sobre esforços na estrutura para possíveis pontos que necessitem de proteção especial (Palauro, 2012).

Os estudos sobre as pressões a jusante de comportas, geralmente são realizados em modelos, porém recentemente foram realizados alguns estudos em modelos hidráulicos de diferentes escalas com características genéricas de um sistema de enchimento e esvaziamento de câmara de eclusa com comporta invertida por Trierweiler (2006), Palauro (2012), Dalla Corte et al. (2012), Dalla Corte (2013), Battiston (2013), Kempka (2014), Dutra (2014), Abreu (2014) e Santos (2015).

Trierweiler (2006), avaliou o campo de pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta em um canal aberto com o intuito de propor uma metodologia de previsão de valores de pressão com diferentes probabilidades. Através da comparação do campo de pressões entre o ressalto hidráulico livre a jusante de uma comporta e a jusante de um vertedouro, concluiu que as distribuições longitudinais da pressão média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e do coeficiente de curtose são muitíssimo semelhantes. E afirmou que as regiões características, determinadas por Marques et al. (1997) para o ressalto formado a jusante de uma comporta, são aplicadas ao ressalto livre a jusante de uma comporta. Também avaliou a influência da submergência sobre a distribuição de pressões junto ao fundo, em ressalto hidráulico a jusante de comporta e através das comparações dos resultados entre o ressalto hidráulico livre e ressalto submerso, verificou que estes apresentam distribuições do coeficiente de assimetria e curtose levemente distintas até a região do rolo, os ressaltos submersos apresentam uma distribuição aparentemente mais próxima da distribuição Normal. A metodologia proposta para

previsão de valores de pressão com diferentes probabilidades se mostrou bastante eficiente. No entanto mostrou uma leve tendência de subestimar, na maioria dos casos, os valores extremos máximos de pressão e de superestimar os valores extremos mínimos.

Palauro (2012) avaliou as pressões médias e extremas mínimas a jusante de uma comporta tipo segmento invertida em condutos de eclusas de navegação e comparou estas pressões em regime permanente e em regime transitório de escoamento, concluindo que o comportamento das pressões mínimas para os dois regimes é distinto, sendo que para o regime permanente as pressões extremas mínimas ocorrem para aberturas menores entre 20% e 40% e para regime transitório entre 30% e 70%.

Dalla Corte et al. (2012) e Dalla Corte (2013) estudaram pressões em regime de escoamento permanente através de simulações numérica, podendo afirmar que o modelo numérico reproduz com boa aproximação os resultados experimentais de pressões médias na base e no teto do conduto a jusante da comporta. Concluiu que há um decréscimo da pressão, abaixo e a jusante da comporta, que os diferenciais de pressão tornam-se mais acentuados à medida que a comporta fecha e que o comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui à medida que a abertura da comporta aumenta.

Battiston (2013) caracterizou o comportamento das pressões médias, flutuantes, máximas e mínimas ao longo da base e do teto do conduto por meio de uma relação entre coeficientes adimensionais de posição (Equação 10) e de pressão média (Equação 11), flutuação de pressão (Equação 12), pressão mínima 0,1% (Equação 13) e 1% (Equação 14).

$$L_{adm} = \frac{L_i}{D - a} \quad \text{Equação 10}$$

$$C\bar{P} = \frac{\bar{P} - \bar{P}_{a100\%}}{\frac{v_a^2 - v_p^2}{2g}} \quad \text{Equação 11}$$

$$C'P = \frac{SD}{\frac{v_a^2 - v_p^2}{2g}} \quad \text{Equação 12}$$

$$CP_{0,1\%} = \frac{P_{0,1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}} \quad \text{Equação 13}$$

$$CP_{1\%} = \frac{P_{0,1\%} - \bar{P}}{\frac{V_a^2 - V_D^2}{2g}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

L_{adm} = coeficiente de posição;

L_i = posição dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta;

D = altura do conduto;

a = abertura da comporta;

\bar{P} = pressão média no ponto de medição para determinado grau de abertura da comporta;

$\bar{P}_{a100\%}$ = pressão média no ponto de medição para a mesma condição de vazão a \bar{P} e 100% de abertura da comporta;

V_a = velocidade média na seção da comporta;

V_D = velocidade média no conduto;

g = aceleração devida à gravidade;

$C'P$ = coeficiente de flutuação de pressão;

SD = flutuação de pressão;

$P_{0,1\%}$ = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99,9% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;

$P_{1\%}$ = pressão no ponto de medição igualada ou superada em 99% das ocorrências para determinado grau de abertura da comporta;

As Figura 15 (a), (b), (c) e (d) apresentam as curvas ajustadas para representar a relação entre os adimensionais de posição e pressão média, flutuação de pressão, pressão mínima 0,1% e 1%, respectivamente.

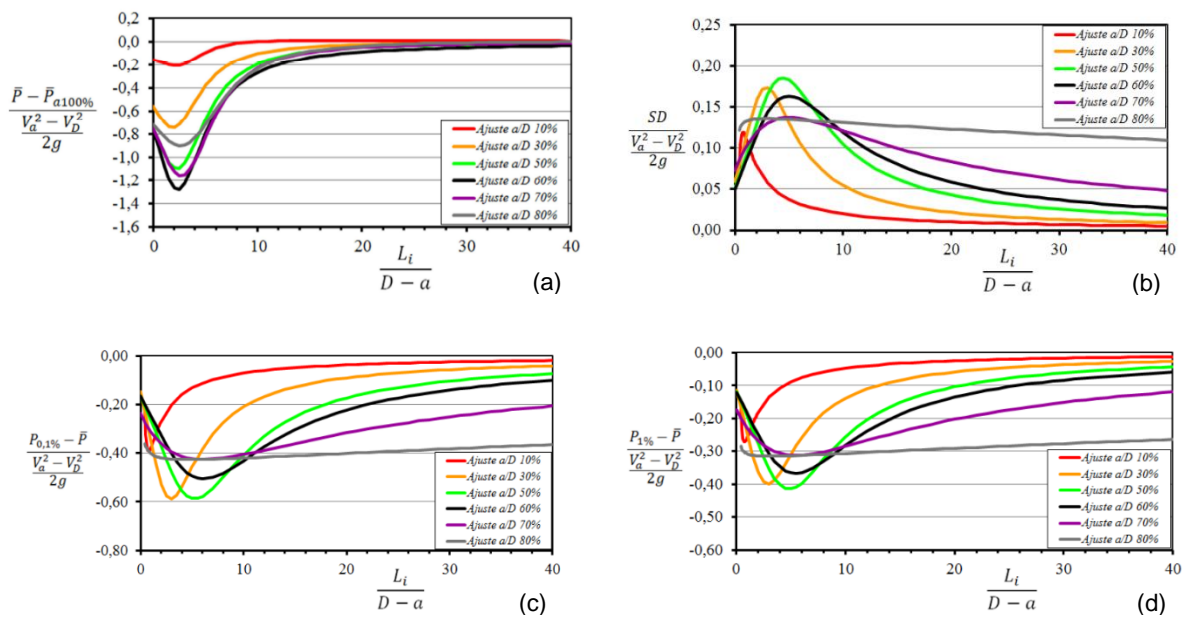


Figura 15 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e (a) pressão média, (b) flutuação de pressão, (c) pressão mínima 0,1% e (d) pressão mínima 1% para a base do conduto. Fonte: Battiston, 2013.

Battiston (2013), concluiu que para as condições operacionais com a comporta parcialmente aberta, as menores pressões ocorreram no teto do conduto próximo à comporta, região de recirculação do escoamento, e junto ao terminal da comporta. Também avaliou a aplicabilidade do software de dinâmica de fluidos computacional, *Flow-3D®* com modelo de turbulência $k-\epsilon$, na simulação do escoamento médio, o qual apresentou resultados mais precisos para a base do conduto.

Kempka (2014) analisou o comportamento da distribuição longitudinal das pressões médias e mínimas (0,1% e 1%) na base e no teto a jusante de comportas tipo segmento invertida e verificou os adimensionais sugerido por Battiston (2013) para estimar os valores da distribuição longitudinal das pressões médias e mínimas junto à base e ao teto da galeria a jusante da comporta, concluindo que esta metodologia pode ser aplicada para todas as aberturas da comporta e que as curvas de ajuste obtidas por Kempka (2014) apresentaram boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013). Também verificou quais condições de abertura da comporta e a que distância da comporta ocorrem as pressões mínimas junto à base e ao teto.

Dutra (2014) desenvolveu através de uma metodologia adimensional de análise, um critério hidráulico para determinar as pressões médias na base e no teto do conduto a jusante da comporta, através de uma equação ajustada por três

coeficientes (A, B e C), tendo somente a abertura da comporta, a distância que se quer analisar da mesma e a vazão de operação como variáveis de dimensionamento. Também verificou o comportamento da pressão média, o qual foi semelhante no teto e na base do conduto, apresentando uma diminuição da pressão para as menores aberturas da comporta e maiores vazões.

Abreu (2014), analisou a aplicabilidade da metodologia proposta por Kempka (2011), que consiste em definir uma relação entre o índice de cavitação e a abertura da comporta, correlacionando pressões limites de resistência à tração do concreto com índices de cavitação associados à distintas probabilidades de ocorrências de esforços hidrodinâmicos. Também analisou as distribuições das pressões médias e mínimas, onde concluiu que para as aberturas de 30 e 40% existe uma maior zona de influência das pressões e os principais efeitos da erosão por cavitação se manifestam nos pontos de pressão mínima, a uma distância entre 15 a 20cm da comporta tipo segmento invertido, e transpondo os dados de modelo para protótipo representaria uma medida aproximadamente de 8m da zona de ação do fenômeno.

Santos (2015) caracterizou o comportamento hidráulico de escoamentos aerados a jusante de comportas tipo segmento invertido, através da análise e comparação das pressões médias, flutuantes, máximas e mínimas que atuam na base de um conduto com seção retangular em escoamentos aerados e não-aerados. Definindo, também, os limites mínimos de incorporação de ar no escoamento em função da vazão para cada abertura. Santos (2015) concluiu que os escoamentos com maior vazão líquida em cada abertura são os responsáveis por impor as pressões médias, flutuantes, máximas e mínimas mais intensas ao longo da base do conduto, porém não foram registradas diferenças entre escoamentos aerados e não-aerados capazes de mudar significativamente o regime destas pressões na base do conduto nos ensaios analisados.

3. Metodologia

Os aspectos metodológicos dessa pesquisa iniciaram-se por uma investigação experimental detalhada sobre as características hidráulicas do escoamento a jusante de uma comporta em um modelo físico hidráulico, com ênfase na avaliação dos resultados experimentais obtidos na investigação através de métodos estatísticos e parâmetros adimensionais que demonstraram-se relevantes na avaliação do escoamento.

Para a compreensão e determinação das características do comportamento hidráulico do escoamento a jusante de comporta foi necessário o monitoramento e a análise de grandezas físicas, principalmente, das distribuições longitudinais de pressões, em termos médios, flutuantes e extremos que ocorrem em diferentes vazões e aberturas da comporta.

Neste item são descritas a instalação experimental, a instrumentação realizada, os processos de aferição dos equipamentos e a investigação experimental, bem como as condições de medição e as grandezas físicas auferidas durante o processo de experimentação. Aqui também está descrita a metodologia analítica indicando como foi feito o tratamento e a análise dos dados.

3.1 Instalação Experimental

As investigações experimentais desta pesquisa foram desenvolvidas no modelo físico hidráulico de um aqueduto de um sistema de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação de média/alta queda, no qual está instalada uma comporta tipo segmento invertida. Este modelo está implantado no Laboratório de Hidráulica do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas, tendo como base dois outros modelos físicos, um situado no IPH – UFRGS e outro situado em FURNAS Centrais Elétricas.

O modelo físico conta com um sistema de armazenamento de água, de bombeamento, de circulação de água e a seção de interesse do estudo, que é composta pelo aqueduto, a comporta e as tomadas de pressões, conforme pode-se visualizar na Figura 16.

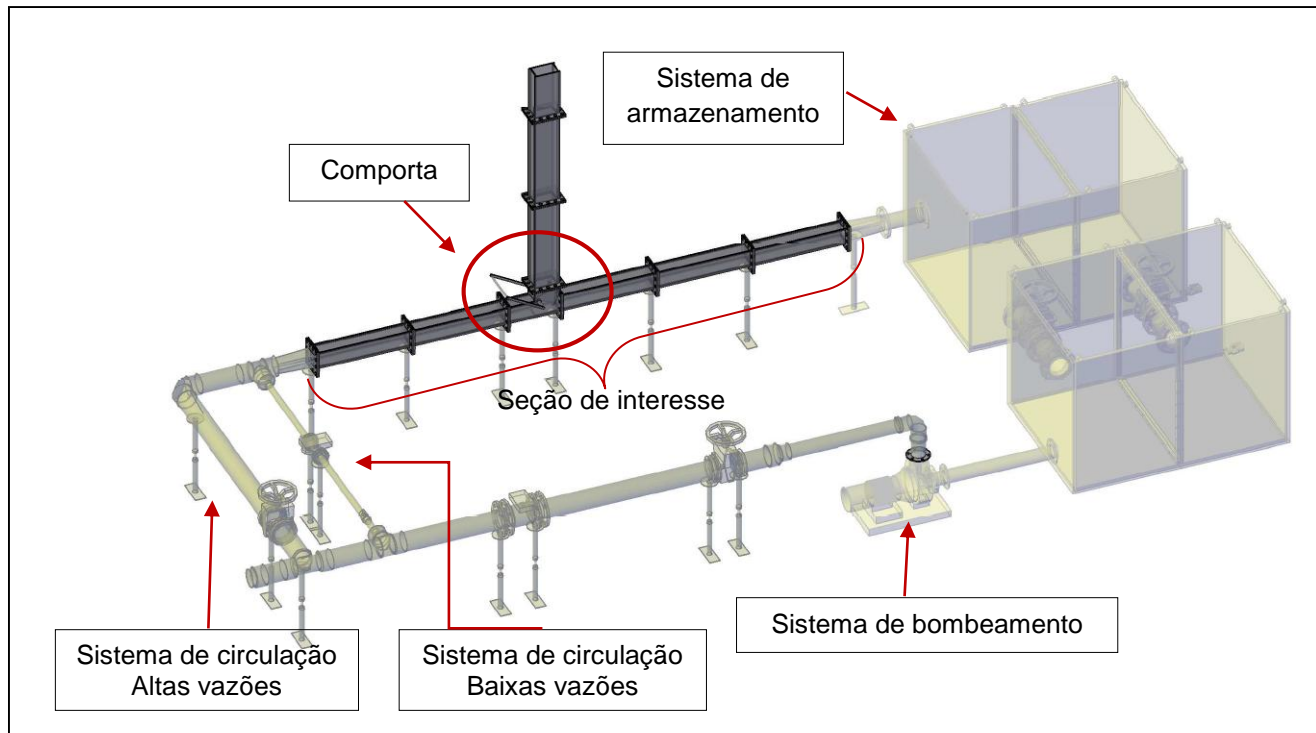


Figura 16 - Modelo físico do sistema hidráulico. Autor: Fernanda Fernandes M. de Oliveira

O sistema de armazenamento (Figura 17) é composto por dois reservatórios de aço galvanizado, com capacidade máxima de volume de $5,5\text{m}^3$ e dimensões de $2,00\text{m} \times 1,40\text{m} \times 1,50\text{m}$. Os reservatórios estão interligados por duas tubulações de 300mm de diâmetro, com registro de gaveta em ferro fundido, permitindo regular os níveis de água entre os reservatórios.



Figura 17 - Sistema de Armazenamento

A água dos reservatórios é bombeada para o sistema de circulação através de um conjunto motor bomba, como pode ser visualizado na Figura 18, da marca Imbil, com uma potência de 10CV, altura manométrica 10m.c.a. e vazão máxima de $200\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. Para a variação das vazões ensaiadas, foi utilizado um inversor de frequências da marca Weg, modelo CFW-08 (Figura 18) que trabalha de 12Hz a 60Hz e atua diretamente sobre o motor da bomba hidráulica controlando a rotação do motor e, conseqüentemente, a vazão bombeada.



Figura 18 - Sistema de bombeamento e inversor de frequências.

Após o bombeamento, a água é direcionada para o sistema de circulação (Figura 19), que está dividido em dois circuitos, um para vazões baixas ($2,5\text{L.s}^{-1}$ até $7,1\text{L.s}^{-1}$) e outro para vazões altas ($10,6\text{L.s}^{-1}$ até $31,8\text{L.s}^{-1}$).

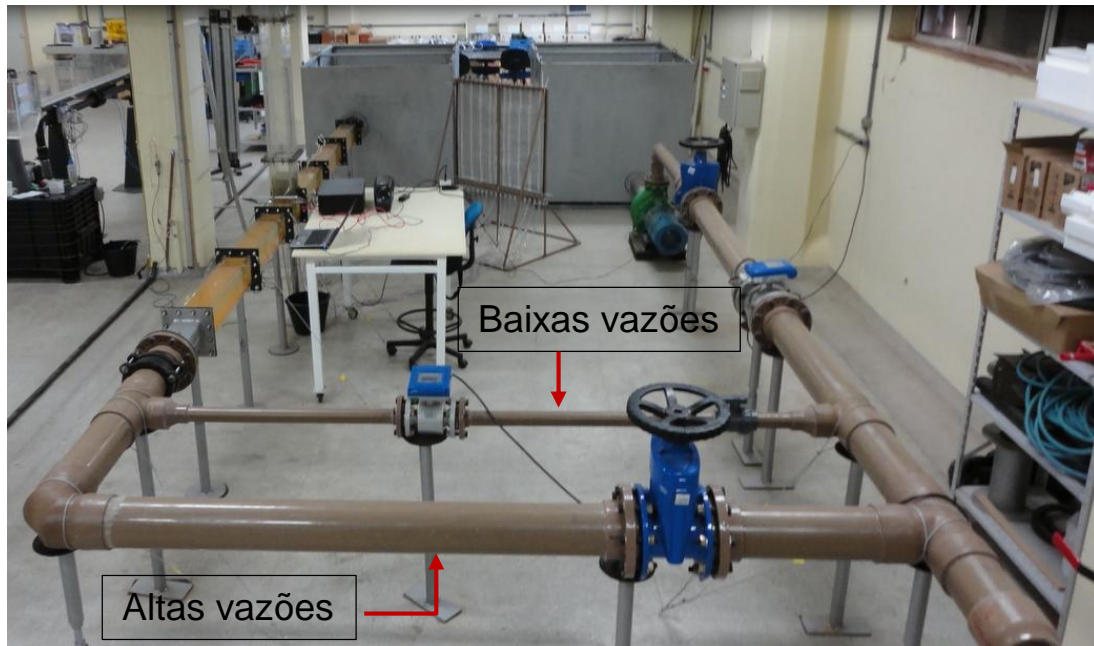


Figura 19 - Sistema de circulação.

O sistema de circulação para baixas vazões possui diâmetro de 50mm e para as vazões altas o diâmetro é de 150mm, ambos de PVC. Ao longo do circuito de vazões altas estão instaladas válvulas de gaveta e no circuito de baixas vazões está instalada uma válvula globo, a fim de controlar ou interromper o fluxo de água. No sistema de circulação de água, também estão instalados dois medidores eletromagnéticos de vazão (modelo IFC100C) acoplados à conversores de sinal (Optiflux KC2000C/6) da marca Krohne (Figura 20), sendo um de precisão de $0,01\text{L.s}^{-1}$ no circuito de baixas vazões, e outro para altas vazões cuja precisão é de $0,1\text{L.s}^{-1}$. Conforme a recomendação dos fabricantes, os medidores eletromagnéticos foram instalados a uma distância de dez vezes seu diâmetro de montante e de cinco vezes seu diâmetro a jusante de qualquer mudança de geometria ou singularidade presentes na tubulação do sistema, para evitar interferências em seus resultados.



Figura 20 - Medidor eletromagnético de vazão.

A jusante do sistema de circulação está implementada a seção de interesse do estudo (Figura 21), que é composta por uma seção quadrada de acrílico, com dimensões $0,125\text{m} \times 0,125\text{m}$ e comprimento de $3,00\text{m}$, que corresponde ao aqueduto de enchimento e esvaziamento de uma eclusa, por uma comporta de segmento invertida (Figura 22) de ferro fundido comum com raio de $0,185\text{m}$, uma chaminé de equilíbrio em acrílico, com dimensões de $0,125\text{m} \times 0,20\text{m}$ e altura de $3,5\text{m}$. Por fim, a jusante da comporta, tem-se um trecho de acrílico com $4,5\text{m}$ de comprimento, onde foram instaladas as tomadas de pressão.



Figura 21 - Seção de interesse do estudo

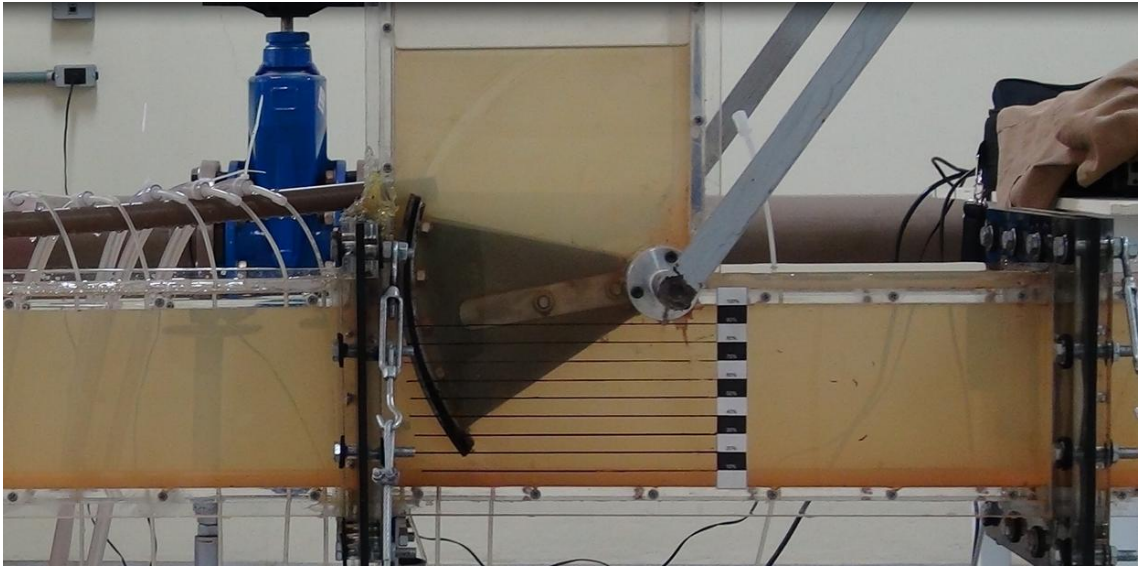


Figura 22 - Comporta tipo segmento invertido

As tomadas de pressão são tubos com diâmetro de 3mm e comprimento de 0,10m, com uma das extremidades conectada a uma pequena abertura circular no trecho de acrílico e a outra extremidade a um adaptador que interliga ao medidor pressão e ao piezômetro convencional. Elas estão localizadas na parte superior e inferior do trecho de acrílico, sendo que na parte inferior estão instaladas 17 tomadas de pressão a jusante da comporta, quando a mesma está totalmente fechada, e, 1 tomada de pressão a montante da comporta (M), conforme pode-se visualizar na Figura 23. O espaçamento entre tomadas de pressão permiti delinear o perfil do comportamento das pressões a jusante da comporta com maior discretização na região próxima da mesma. As últimas tomadas de pressão estão instaladas a uma distância de 1,16m da face da comporta, visando o controle das condições de ensaio, posição onde os efeitos hidráulicos provocados pela comporta já não são mais verificados.



Figura 23 - Disposição das tomadas de pressão na base do conduto (as medidas estão em centímetros).

3.2 Grandezas Físicas e Instrumentação Utilizada

Para determinar as características do comportamento hidráulico do escoamento e prever as pressões atuantes a jusante de comportas tipo segmento invertida instaladas em condutos, realizou-se a medição das grandezas físicas hidráulicas durante a execução dos ensaios como: pressões médias, pressões “instantâneas”, graus de abertura da comporta, vazões e níveis de água.

3.2.1 Pressões Médias

As pressões médias foram registradas nas 17 posições na parte inferior do conduto. As tomadas de pressão instaladas no conduto foram conectadas por uma peça para o engate do tubo de 10mm de diâmetro, que transmite a pressão para o quadro piezométrico, este graduado milimetricamente, e que possui 18 unidades de piezômetros. A escala foi referenciada altimetricamente com o fundo do conduto, obtendo, por visualização, as pressões médias atuantes em cada ponto.

Conforme o ponto de medição e a vazão ensaiada a variação do nível de água nos piezômetros oscilava em magnitudes distintas. Desta forma, foi estabelecido um tempo mínimo de 1 minuto para a visualização do piezômetro em cada ponto de leitura, e assim o observador estabelecia o valor preponderante da pressão no ponto.

Durante a instalação dos piezômetros convencionais, foram tomados os devidos cuidados para evitar a presença de bolhas de ar nos tubos, reduzindo erros na medição das pressões.

3.2.2 Pressões flutuantes

As pressões flutuantes foram tomadas em 16 posições na parte inferior do conduto. As posições para as medições das pressões flutuantes estão de acordo com a posição relativa das tomadas de pressão do modelo implementado no IPH/UFRGS.

As pressões flutuantes foram registradas ao fundo da tubulação imediatamente a jusante da comporta, através de transdutores de pressão rosqueados nas tomadas de pressão.

Neste estudo foram utilizados transdutores de pressão piezorresistivos da marca ZURICH, modelo PSI.420, precisão de 0,1% FE, operando em diferentes faixas

de acordo com a posição da tomada de pressão. A Tabela 1 mostra as faixas que cada transdutor operou, a qual pode ser comparada com a Figura 23, que mostra a posição de cada transdutor na base do conduto. A escolha das faixas de operação dos transdutores foi baseada no estudo de Dutra (2014), que analisou o comportamento das pressões médias, obtidas através dos piezômetros, na base e no teto do conduto retangular à jusante da comporta.

Tabela 1 - Faixa de operação dos transdutores da base do conduto

| Tomada de pressão | Faixa de operação | Distância a partir do batente da comporta (cm) |
|--------------------------|--------------------------|---|
| 1 | -1 a 3 m.c.a | 0,0 |
| 2 | -1 a 3 m.c.a | 3,6 |
| 3 | -1 a 1 m.c.a | 6,1 |
| 4 | -1 a 1 m.c.a | 13,6 |
| 5 | -1 a 1 m.c.a | 18,6 |
| 6 | -1 a 1 m.c.a | 23,6 |
| 7 | -1 a 1 m.c.a | 28,6 |
| 8 | -1 a 1 m.c.a | 36,1 |
| 9 | -1 a 1 m.c.a | 43,6 |
| 10 | -1 a 1 m.c.a | 51,1 |
| 11 | -1 a 1 m.c.a | 58,6 |
| 12 | 0 a 2 m.c.a | 66,1 |
| 13 | 0 a 2 m.c.a | 76,1 |
| 14 | 0 a 2 m.c.a | 86,1 |
| 15 | -0,5 a 0,5 m.c.a | 96,1 |
| 16 | -0,5 a 0,5 m.c.a | 106,1 |
| 17 | | 116,1 |

Os transdutores são equipamentos que convertem uma grandeza física em sinal elétrico (tensão ou corrente). Os transdutores de pressão têm como elemento sensível uma membrana que, ao ser defletida pela pressão atuante sobre ela, ocasiona alteração na resistência elétrica do circuito embarcado, alterando o sinal de resposta do equipamento excitado eletricamente (DAI PRÁ, 2011).

Os sinais elétricos resultantes das medições foram convertidos para pressão (grandeza física) a partir de curvas de aferição para cada sensor e assim foi possível sua interpretação.

O processo de aferição dos sensores foi efetuado individualmente, por meio de um piezômetro convencional, instalado em uma parede ao lado de uma escala de

medida, onde foram impostas diferentes níveis d'água. A este piezômetro foram conectados os transdutores de pressão. Os transdutores foram, então, submetidos às diferentes alturas para que fosse possível relacionar os valores de tensão com os valores de pressão observados na coluna d'água. No software AqDados, onde é possível aferir os transdutores ao informar as leituras de pressão, os limites inferiores e superiores foram calculados por regressão linear. Isto foi repetido para todos os transdutores utilizados, visto que cada um possui sua própria curva de calibração.

Os dados de pressões flutuantes foram adquiridos através de um microcomputador e um sistema de aquisição de dados modular e integrado, da marca LYNX Tecnologia, modelo ADS2002IO-B-3 da série SF2034 para 32 canais de entradas analógicas, interligado a um módulo condicionador de sinais não isolado modelo AI2161-VC. Para coletar os sinais dos transdutores de pressão foram utilizados o software AqDados 7.02 da LYNX Tecnologia.

Durante a instalação dos transdutores de pressão foram tomados os devidos cuidados para evitar a presença de bolhas de ar, reduzindo erros na medição das pressões devido a possíveis interrupções do fluxo d'água com o equipamento.

As pressões flutuantes foram coletadas com transdutores de pressão à frequência de 200Hz com 10 minutos de duração de forma simultânea para todas tomadas de pressão e para cada condição de ensaio. O tempo e a frequência para a aquisição dos dados foram escolhidos de maneira que permitisse uma coleta representativa sem interferência dos resultados a serem gerados.

3.2.3 Grau de abertura da comporta

Para o controle do grau de abertura da comporta foi inserido uma graduação externa ao aqueduto elaborada a partir da distância do raio da comporta e o fundo do conduto. A escala varia de 10% em 10% até a abertura total da estrutura, representando 100% da abertura da comporta. Na regulação do grau de abertura da comporta é necessário ter exatidão, principalmente para as pequenas aberturas, que podem diminuir ou aumentar a vazão simulada apenas com a diferença de poucos milímetros.

A partir deste controle é possível realizar ensaios com diferentes aberturas da comporta e, assim verificar o comportamento das pressões atuantes a jusante da comporta para diferentes aberturas.

3.2.4 Vazão

A escolha das vazões ensaiadas foram definidas a partir de relações adimensionais, através do número de Froude, dos dados existentes provindos do modelo reduzido instalado no IPH/UFRGS e o protótipo para as dimensões do modelo em estudo, permitindo comparar os resultados obtidos nos dois modelos.

As vazões ensaiadas estão dispostas na Tabela 2, juntamente com seu respectivo número de Froude e Reynolds.

Tabela 2 - Vazões ensaiadas, número de Froude e Reynolds

| Vazão (L.s⁻¹) | Número de Froude | Reynolds |
|---------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 2,5 | 0,144 | 19801,98 |
| 2,8 | 0,162 | 22178,22 |
| 3,2 | 0,185 | 25346,53 |
| 3,9 | 0,225 | 30891,09 |
| 5,0 | 0,289 | 39603,96 |
| 5,7 | 0,329 | 45148,51 |
| 7,1 | 0,410 | 56237,62 |
| 10,6 | 0,613 | 83960,40 |
| 14,1 | 0,815 | 111683,17 |
| 15,9 | 0,919 | 125940,59 |
| 19,8 | 1,144 | 156831,68 |
| 23,0 | 1,329 | 182178,22 |
| 27,4 | 1,584 | 217029,70 |
| 31,8 | 1,838 | 251881,19 |

As vazões foram registradas através dos medidores eletromagnéticos de vazão. O intervalo entre os valores de vazões ensaiadas possibilita uma análise mais detalhada do comportamento das pressões atuantes a jusante da comporta.

3.2.5 Níveis de água

O nível de água no reservatório de jusante foi controlado através de uma demarcação estabelecida no interior do reservatório, de forma que as cotas de água fossem mantidas iguais em todos os ensaios. Também foi medido o nível de água no poço da comporta, onde dois piezômetros convencionais foram dispostos a montante e a jusante da comporta e a leitura foi realizada através de uma régua milimétrica, podendo assim estabelecer a perda de carga total devido a presença da comporta.

3.3 Condição de ensaio

Foram realizadas duas campanhas de amostragem no modelo reduzido. Na primeira campanha foram obtidos os dados de pressão média no teto do conduto e de pressão instantânea na base do mesmo. Na segunda campanha foram obtidos os dados de pressão média na base do conduto e de pressão instantânea no teto do mesmo. Porém nesta pesquisa foram utilizados somente os dados de pressão média e flutuação de pressão referentes a base do conduto.

No início de cada ensaio os níveis estáticos dos reservatórios eram verificados através de uma demarcação no interior do reservatório de jusante e a ausência de bolhas de ar nos transdutores de pressão e piezômetros. Após isto, realizou-se uma amostragem das pressões estáticas do sistema, com uma frequência de 100Hz durante o período de 5 minutos.

Posteriormente, a aquisição dos dados de pressão estática, regulava-se o grau de abertura da comporta. Em seguida, o sistema de circulação de água era ligado e através do inversor de frequência e dos medidores eletromagnéticos de vazão, era estabelecida para a condição de ensaio desejada.

Com o sistema funcionando em regime permanente, ou seja, sem variação na pressão média e velocidade do escoamentos, os dados de pressão instantânea foram adquiridos através dos transdutores, na frequência de 200Hz e duração de ensaio de 10 minutos. Concomitantemente, eram realizadas as medições das pressões médias através da leitura dos níveis de água nos piezômetros convencionais. Também foram realizadas as leituras dos piezômetros instalados a montante e a jusante da comporta para verificar a perda de carga causada pela mesma.

Este procedimento foi realizado para todas as aberturas (10% à 100%) e para cada abertura foram ensaiadas todas as vazões, com exceção de algumas aberturas menores, devido à capacidade de volume do poço da comporta não ser suficiente.

Após adquiridos os dados de pressão instantânea, foi realizada a sua consistência e, logo, os mesmos eram convertidos para versão texto (padrão ASCII) através do software AqDAnalysis 7 para posterior análise estatística.

3.4 Modelo físico hidráulico IPH - UFRGS

Os dados experimentais de pressão média, flutuação de pressão e pressões extremas mínimas obtidos em um outro modelo físico hidráulico de aqueduto de enchimento/esvaziamento de uma eclusa de navegação, onde está instalada uma comporta segmento invertido, implantado no IPH – UFRGS foram utilizados para verificar os adimensionais e ajustes propostos nesta pesquisa.

Como o modelo físico da UFPel foi construído com base em dois outros modelos, um deles da IPH - UFRGS, é possível comparar os resultados obtidos em ambos modelos e assim conferir o comportamento das equações propostas. As vazões ensaiadas em ambos modelos são correspondentes e estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazões correspondentes modelos UFPel e UFRGS

| Vazão ensaiada UFPel (L.s⁻¹) | Vazão ensaiada UFRGS (L.s⁻¹) |
|--|--|
| 2,5 | 14 |
| 2,8 | 16 |
| 3,2 | 18 |
| 3,9 | 22 |
| 5,0 | 28 |
| 5,7 | 32 |
| 7,1 | 40 |
| 10,6 | 60 |
| 14,1 | 80 |

O modelo físico do IPH – UFRGS consiste em um sistema hidráulico composto, basicamente, por reservatórios, canais, bombeamentos, condutos, registros e comporta, conforme pode-se visualizar na Figura 24.



Figura 24 - (a) Vista do reservatório, condutos e canal de restituição, (b) Vista do reservatório, condutos e tubulação dos sistema de alimentação. Fonte: Battiston, 2013.

Conforme Battiston (2013) e Kempka (2014), a instalação é composta por um sistema de alimentação (1), uma seção circular com diâmetro nominal de 250mm (2), no qual estão associados: um medidor de vazão eletromagnético e duas bombas (25 e 50CV) com inversor de frequência que permitem aduzir as diferentes vazões ensaiadas. Compõe a bancada de ensaios, também, um conduto principal (3), de seção quadrada com aresta de 0,25m e 8,9m de comprimento, onde está instalada a comporta, sendo neste trecho realizadas as medições. A comporta é do tipo segmento invertida, com raio de 0,38m. Faz parte do sistema, ainda, uma chaminé de equilíbrio com altura de 2,50m, um reservatório de jusante com volume total de 7,2m³ (4), que tem como função manter o escoamento afogado e um canal de restituição (5), que recebe a descarga do reservatório de jusante e conduz ao reservatório de alimentação.

De acordo com Battiston (2013), durante a execução dos ensaios foram registradas a abertura da comporta, a vazão, os níveis no poço da comporta e no reservatório de jusante e as pressões médias e instantâneas ao longo do teto e da base do conduto. A abertura da comporta foi registrada de forma visual com o auxílio de uma régua, conforme apresentado na Figura 25. A vazão foi registrada por meio de um macro medidor eletromagnético de vazão da marca Rosenount, possuindo diâmetro de 250mm, faixa de medição de 15,56L.s⁻¹ a 465,28L.s⁻¹ e vazão mínima medida de 0,62L.s⁻¹, instalado no trecho reto da seção circular.



Figura 25 - Sistema de registro da abertura da comporta. Fonte: Battiston, 2013

Conforme Kempka (2014), as pressões médias foram registradas com a utilização de piezômetros (Figura 26a) imediatamente a jusante da comporta, tanto na base como no teto da tubulação, com os espaçamentos entre as tomadas de pressão variando entre 5 e 20cm. As pressões instantâneas foram adquiridas por meio de transdutores de pressão, alocados, também, na base e no teto do conduto (Figura 26b). Para cada condição de ensaio (vazão e abertura de comporta), foram adquiridos dados durante dez minutos com frequência de 512Hz.

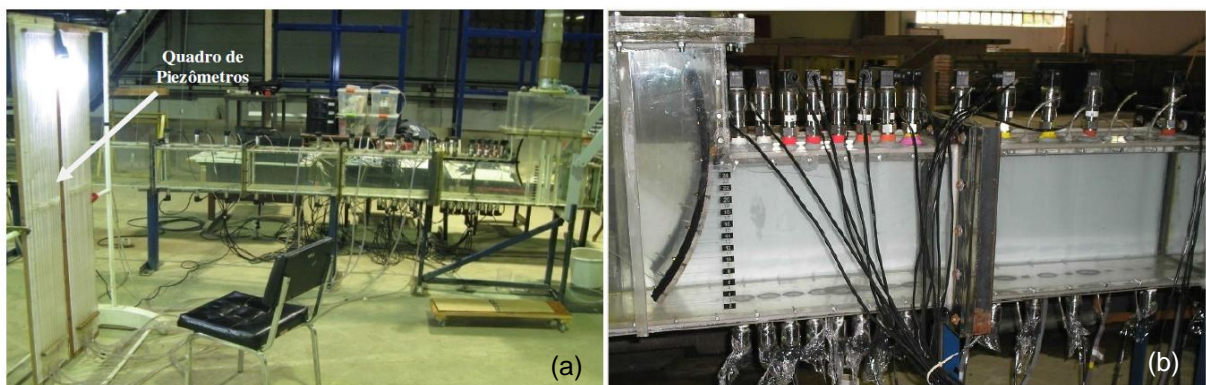


Figura 26 - (a) Medição de pressões médias por meio de piezômetros, (b) Transdutores de pressão, a jusante da comporta, utilizados para medir as pressões instantâneas. Fonte: Kempka, 2014.

Os ensaios foram realizados em regime permanente para diferentes graus de abertura da comporta e carga hidráulica de montante. Não foi permitida a entrada de ar na tubulação a jusante da comporta, durante os ensaios. A saída do conduto de jusante esteve, em todos os experimentos, submersa a um nível mínimo que garantia a tranquilidade do plano da superfície de água (Kempka, 2014).

3.5 Metodologia analítica

3.5.1 Consistência dos dados

Os dados de pressão média foram consistidos com análise da grandeza de cada valor obtido através dos piezômetros convencionais. Caso algum dado coletado estivesse com um valor muito discrepante dos demais, realizava-se uma comparação entre os valores anterior e posterior para mesma condição de abertura e vazão. Na graduação milimétrica do quadro dos piezômetros convencionais, o zero na escala coincide com o fundo do conduto de acrílico, essa demarcação gerava erros pelo acréscimo ou decréscimo na leitura de pressão média e também quando os valores de pressão média passavam de positivos para negativos, mas estes erros eram facilmente detectados durante o processamento e consistência dos dados.

Os dados de pressão “instantâneas” adquiridos pelos transdutores foram analisados durante sua coleta e armazenamento. Quando apresentassem valores muito acima ou muito abaixo do admitido pela faixa de operação de cada sensor, esse ensaio era descartado e realizado um novo ensaio para verificação/confirmação do dado coletado.

3.5.2 Análise estatística

Após a consistência dos dados amostrados e devidamente corrigidos os eventuais erros grosseiros de leitura, foram aplicadas as análises estatísticas no conjunto de amostras representativas do modelo. Foram determinados os seguintes parâmetros: média, desvio padrão, assimetria, curtose e os percentis de $P_{0,1\%}$, $P_{1\%}$, $P_{99\%}$ e $P_{99,9\%}$.

Para o conjunto de dados das pressões “instantâneas” calculou-se a média aritmética simples para cada abertura da comporta e vazão ensaiada, e posteriormente, descontou-se o valor da média obtido de cada valor de pressão instantânea. Utilizando os dados de pressão instantânea com média zero, evita-se possíveis erros de calibração nos transdutores, considerando apenas a variação do sinal de pressão obtido pelo transdutor.

O desvio padrão (σ) foi calculado para as amostras de pressão instantânea, indicando quanto as observações diferem entre si e a sua variação em torno da média

aritmética do conjunto amostral. Fisicamente, o desvio padrão representa as flutuações de pressão em cada ponto de medição ao longo do aqueduto a jusante da comporta.

O formato de uma distribuição pode ser indicado através da assimetria e curtose. A assimetria foi determinada para verificar o grau e o sentido do afastamento da simetria do conjunto de dados de pressão instantânea em torno de sua média aritmética. Através da curtose determinou-se o grau de achatamento da distribuição relacionada com o grau de concentração das pressões “instantâneas”.

Os percentis de $P_{0,1\%}$, $P_{1\%}$, $P_{99\%}$ e $P_{99,9\%}$ foram determinadas para o conjunto de dados de pressões “instantâneas” com média zero e, posteriormente, somados com a média dos piezômetros convencionais. Estes parâmetros indicam, estatisticamente, as pressões “instantâneas” medidas e atribuídas a uma probabilidade de não-excedência 0,1%, 1%, 99% e 99,9% ao longo do tempo.

3.5.3 Pressões Médias (P_x), Flutuação de pressão (σ_x) e Pressões extremas ($P_{x\%}$)

Para conhecer o comportamento das pressões médias, flutuação de pressão e pressões extremas ao longo da base do conduto a jusante da comporta, as mesmas foram plotadas em gráficos onde no eixo das ordenadas tem-se a carga de pressão (mm.c.a.) e no eixo das abcissas tem-se a distâncias acumuladas a partir da borda da comporta (m), em função da abertura da comporta e da vazão ensaiada.

As pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representam as pressões mínimas e 99,0% e 99,9%, representam as pressões máximas. Apesar destas pressões ocorrerem durante uma pequena parcela do tempo, possibilita que se tenha uma estimativa dos valores mínimos e máximos que as pressões podem atingir.

Com o propósito de encontrar uma relação que caracterize o comportamento da distribuição de pressões médias e flutuação de pressão a jusante de comportas na base do conduto para cada abertura e que auxilie na predição de pressões com distintas probabilidade de ocorrência, foi aplicada a técnica de análise dimensional. Podendo ser representado por um coeficiente adimensional de posição e por um coeficiente adimensional de pressão média e flutuação de pressão.

Através do software CurveExpert, os coeficientes adimensionais de pressão média e flutuação de pressão foram plotados em gráficos, onde foram testadas

diferentes funções para cada abertura da comporta, identificando a função que melhor ajustou-se para cada abertura da comporta.

3.5.4 Coeficiente estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)

A estimativa das pressões com determinada probabilidade de não excedência ($P_{x\%}$) atuantes junto a base do conduto a jusante de comportas pode ser realizada a partir da proposta sugerida por Marques et al., (1997), a qual considera o efeito acumulativo devido às pressões médias (P_x) atuantes em cada ponto ao longo do conduto e às flutuações de pressão (σ_x) ponderadas por um coeficiente estatístico e característico de distribuição de probabilidades (N), conforme a Equação 15:

$$P_{x\%} = P_x \pm N \cdot \sigma_x$$

Equação 15

Com os dados de pressão média e pressão com probabilidade de não-excedência de 0,1%, 1%, 99% e 99,9% foi possível, através da Equação 15, estimar o coeficiente N para cada abertura da comporta, cada vazão ensaiada e com distintas probabilidades de não-excedência.

A fim de agrupar os dados do coeficiente N, foram plotados gráficos com os seus valores no eixo das ordenadas e no eixo das abscissas foram testados alguns adimensionais.

Em seguida, por meio do software CurveExpert estes dados foram plotados em gráficos e analisou-se o comportamento e, testou-se diferentes funções para cada abertura da comporta, identificando a função que melhor ajustou-se para cada abertura da comporta, para assim ser possível, determinar os coeficientes com distintas probabilidades de não-excedência para cada abertura.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados no modelo físico do aqueduto de enchimento e esvaziamento de uma eclusa de navegação, implantado no Laboratório de Hidráulica do curso de Engenharia Hídrica da UFPel. Cabe salientar que as grandezas dimensionais referem-se a valores de modelo.

4.1 Comportamento das Pressões Médias

As pressões médias registradas ao longo da base do conduto a jusante da comporta segmento invertida estão apresentadas em função da abertura da comporta (Figura 27 e Figura 28) e da vazão ensaiada (Figura 29 e Figura 30), pela posição longitudinal ao longo da base do conduto, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da borda da comporta.

Nas Figura 27 e Figura 28 estão apresentados o comportamento da pressão média para as aberturas de 30% e 50%, as demais aberturas encontram-se no Apêndice A.

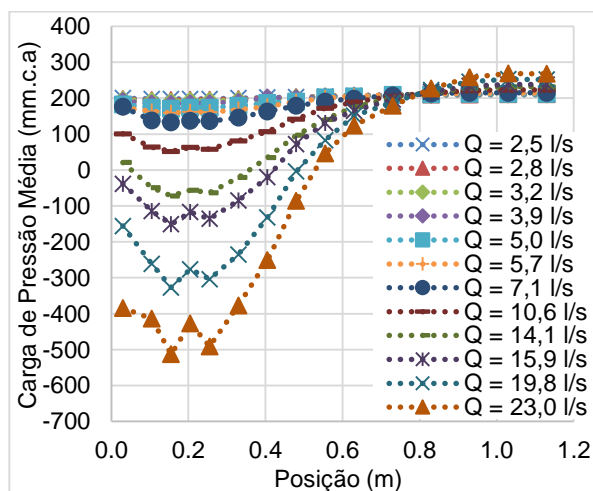


Figura 27 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 30%

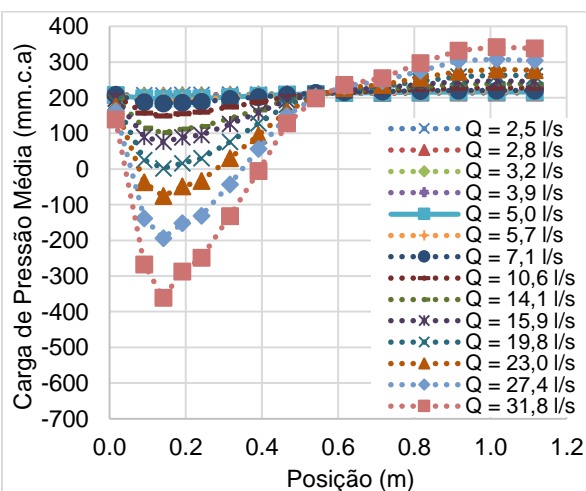


Figura 28 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 50%

Através da análise do comportamento das pressões médias verificadas na base ao longo do conduto a jusante da comporta verifica-se que as pressões médias mínimas ocorrem logo a jusante da comporta. De maneira geral, ocorre uma queda até uma certa distância, entre 0,10 a 0,20m. Após a queda de pressão a mesma se

eleva gradativamente estendendo-se da borda da comporta até uma distância entre 0,50 e 0,80m a jusante da comporta, sendo diferente para cada abertura da comporta e aumenta com a vazão para uma mesma abertura. Este comportamento demonstra a influência que a comporta exerce sobre o escoamento, onde para as menores aberturas a área de influência é maior, conforme pode-se visualizar no Apêndice A.

Após o término da influência da comporta as pressões médias estabilizam-se e em torno de 200mm.c.a. para as menores vazões e para as vazões maiores as pressões médias estabilizam-se na ordem de 300mm.c.a.. Este valor é próximo do valor referente ao nível do reservatório de jusante, atuando o efeito da perda de carga linear.

Este comportamento ocorre para as aberturas entre 10 e 70%, porém para a condição de 10% de abertura da comporta, observou-se que o comportamento da pressão média possui uma instabilidade maior quando comparado ao comportamento das demais aberturas, a qual cresceu e decresceu rapidamente em uma distância menor até atingir a estabilidade, isto ocorre por esta ser a menor a abertura, favorecendo a ocorrência de turbulência a jusante da comporta.

À medida que a vazão aumenta para uma mesma abertura, as pressões médias diminuem na região onde ocorrem as pressões mínimas. Nas aberturas de comporta entre 10 e 60% o escoamento apresenta valores negativos de pressão média. As menores pressões registradas foram na ordem de -700mm.c.a e -500mm.c.a para a vazão de $31,8 \text{ L.s}^{-1}$ (abertura de 40%) e $23,0 \text{ L.s}^{-1}$ (abertura de 30%), respectivamente, sendo o grau de abertura de 40% a situação mais crítica, corroborando com os resultados de Kempka (2014) e Abreu (2015), onde as duas autoras encontraram resultados de pressão média mais críticos para a abertura de 40%. Na abertura de 70% os valores para as pressões médias são superiores as pressões encontradas para as aberturas inferiores, não constando valores negativos.

Para as aberturas de 80 e 90% o comportamento da pressão média torna-se constantes, indicando que a comporta deixa de influenciar significativamente no comportamento das pressões médias.

Nas Figura 29 e Figura 30 estão apresentados o comportamento das pressões médias para as vazões de $7,1 \text{ L.s}^{-1}$ e $23,0 \text{ L.s}^{-1}$. As demais vazões encontram-se no Apêndice B.

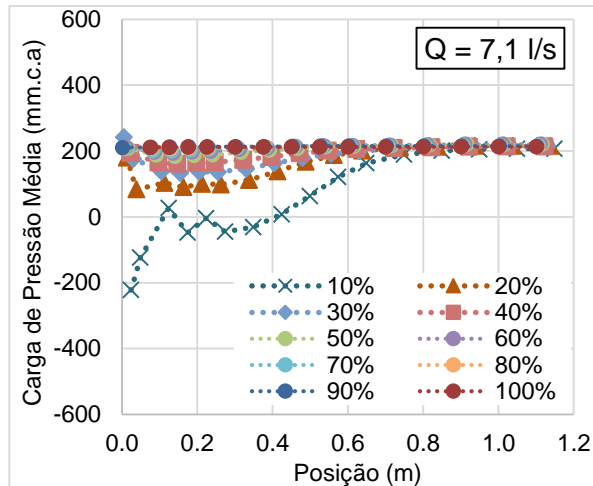


Figura 29 - Comportamento das pressões médias na base, vazão 7,1 l/s

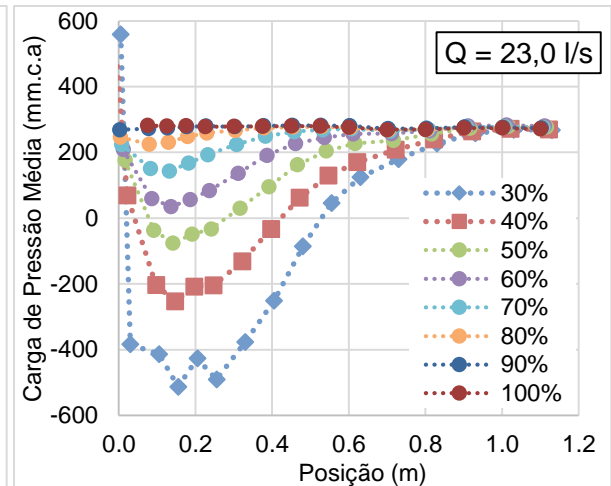


Figura 30 - Comportamento das pressões médias na base, abertura 23,0 l/s

O comportamento das pressões médias agrupadas por vazões, mostra que as menores aberturas, associadas as maiores vazões possuem os menores valores de pressão. Os valores de pressão decrescem até uma determinada distância, entre 0,10 a 0,20m, elevando-se após esta distância até atingir a estabilidade, em torno de 200mm.c.a para as menores vazões e conforme aumenta a vazão o valor da carga de pressão que estabiliza vai aumentando, chegando em torno de 300mm.c.a. para as maiores vazões. A distância onde ocorrem as menores pressões varia conforme a vazão e o grau de abertura da comporta, diminuindo conforme aumenta a vazão.

Apenas para as vazões de 2,5 a 7,1L.s⁻¹ o grau de abertura de 10% foi ensaiado e este apresentou uma maior instabilidade da pressão em comparação com as outras aberturas. Desconsiderando a abertura de 10%, a partir da vazão de 10,6L.s⁻¹ o conjunto de dados de pressão apresenta valores de negativos de pressão, para o grau de abertura de 20% e conforme aumenta a vazão menores valores de pressão são encontrados.

A situação mais crítica encontrada foi para a vazão de 31,8L.s⁻¹ e abertura de 40%, onde o valor foi de -666mm.c.a., considerando as vazões e aberturas ensaiadas.

4.2 Comportamento das Pressões Flutuantes

As pressões flutuantes foram obtidas através da análise estatística das séries de pressões “instantâneas” registradas na base ao longo do conduto a jusante da comporta segmento invertida, representando a variação média de pressão em torno

da média geral das amostras. As mesmas apresentam-se em função da abertura da comporta (Figura 31 e Figura 32) e da vazão ensaiada (Figura 33 e Figura 34), pela posição longitudinal ao longo da base do conduto, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da borda da comporta.

Nas Figura 31 e Figura 32 estão apresentados o comportamento da flutuação de pressão para as aberturas de 30% e 50%. As outras aberturas estão apresentadas no Apêndice C.

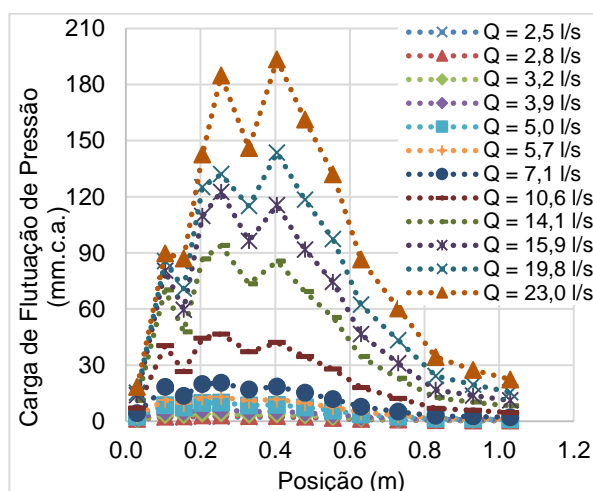


Figura 31 - Comportamento das flutuações de pressões na base, abertura 30%

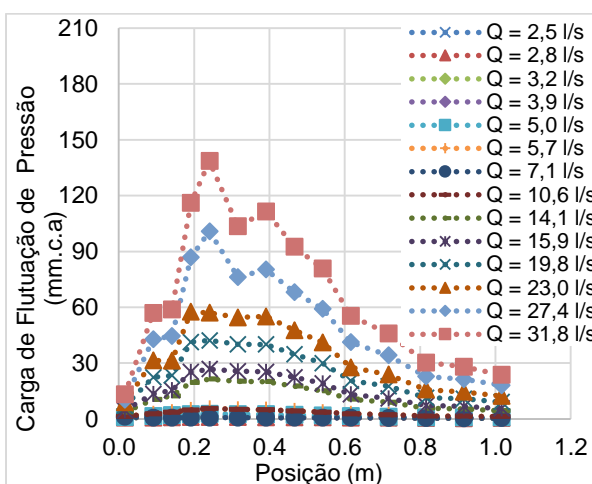


Figura 32 - Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura 50%

Através da análise do comportamento da flutuação de pressão ao longo do conduto, percebe-se que a carga de pressão flutuante, imediatamente a jusante da comporta, assume valores baixos. À medida que a distância aumenta a carga de pressão também aumenta até determinado ponto, em torno de 0,20 a 0,40m, mostrando a influência que a comporta exerce na flutuação de pressão. Após o pico, a carga de pressão flutuante começa a decrescer, até valores próximos ao primeiro ponto próximo da comporta.

Este comportamento ocorre para as aberturas entre 10 e 70%, sendo que para as aberturas de 80 e 90% a flutuação de pressão é mais estável e a maior carga de flutuação é em torno de 10mm.c.a. para a maior vazão ensaiada ($31,8 \text{ L.s}^{-1}$), evidenciando que a comporta passa a não influenciar significativamente no escoamento.

A flutuação de pressão é influenciada pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que à medida que aumenta a vazão os valores das cargas de flutuação de pressão aumentam para uma mesma abertura.

A maior carga de pressão flutuante registrada foi de 203mm.c.a. para a abertura de 40% e vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$, visto que para a abertura de 30% esta vazão não foi ensaiada e para a vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ obteve-se um valor de carga de pressão de 193mm.c.a., superior ao obtido para a abertura de 40% e mesma vazão, o qual apresentou um valor de 120mm.c.a. Palauro (2012) e Santos (2015) constataram que na abertura de 30% foram observados os maiores valores de flutuações de cargas de pressão. Porém comparando as menores vazões ensaiadas nas aberturas de 10 e 20%, as flutuações de pressão são maiores do que para as outras aberturas. Desta forma, a comporta influencia mais na carga de flutuação de pressão para as menores aberturas.

O máximo valor de carga de flutuação de pressão para as aberturas entre 10 e 70% ficou entre 0,20 a 0,40m a jusante da comporta. Nesta região deve haver maior cuidado construtivo, pois segundo Lopardo (1986), os fenômenos associados às pressões flutuantes macroturbulentas podem ser responsáveis por ações destrutivas sobre a estrutura por efeitos de arrancamento, fadiga, vibrações ou cavitação intermitente.

Nas Figura 33 e Figura 34 estão apresentados o comportamento da pressão flutuante para as vazões de $7,1\text{L.s}^{-1}$ e $23,0\text{L.s}^{-1}$, sendo que as demais vazões encontram-se apresentadas no Apêndice D.

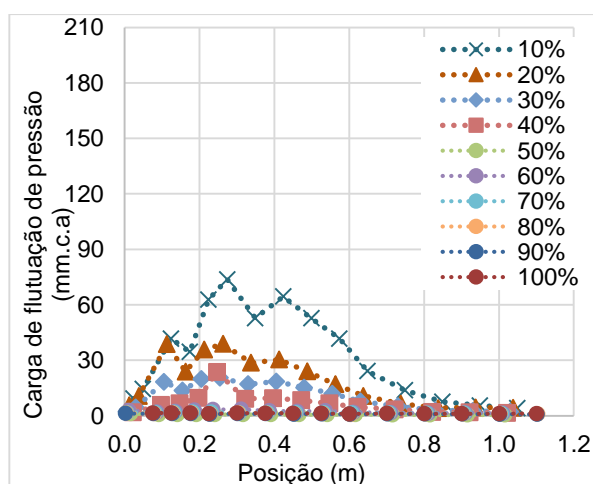


Figura 33 - Comportamento das flutuações de pressões na base, vazão 7,1 l/s

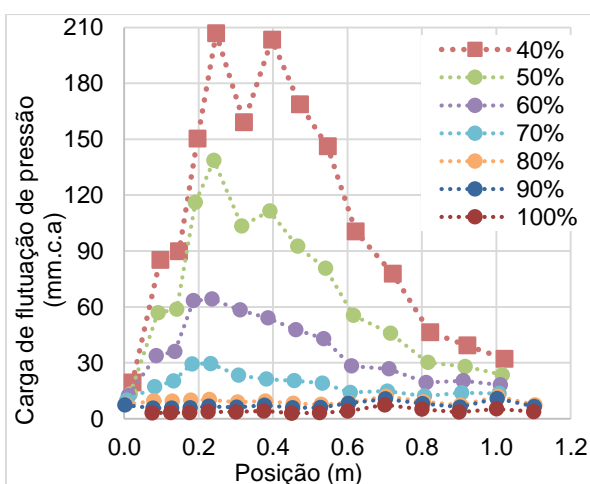


Figura 34 - Comportamento das flutuações de pressões na base, vazão 31,8 l/s

Como visualiza-se nas Figura 33 e Figura 34, a pressão flutuante imediatamente a jusante da comporta admite valores baixos e conforme aumenta a distância da borda da comporta a carga de pressão flutuante aumenta até uma

distância entre 0,20 a 0,40m. Esta distância depende da vazão ensaiada e conforme aumenta a vazão, aumenta também a distância que ocorre a máxima carga de pressão flutuante. Após o pico, a carga de pressão flutuante começa a decrescer até valores próximos ao primeiro ponto próximo da comporta.

A flutuação de pressão é influenciada pela abertura da comporta e pela vazão, sendo que a medida que o grau de abertura diminui os valores de cargas de pressão aumentam para uma mesma vazão.

Para as menores vazões (2,5; 2,8 e 3,2L.s⁻¹) as aberturas de 20 e 40% tiveram um pico de carga de pressão superior as demais aberturas a uma distância de 0,25m da borda da comporta. A partir da vazão de 3,9L.s⁻¹ o pico de pressão neste ponto continua a ocorrer, porém as cargas de flutuação de pressões que ocorrem nas aberturas de 10 e 20% ultrapassam este pico de pressão.

As aberturas de 30 e 40% apresentam as maiores cargas de pressão flutuante para as maiores vazões, onde a maior vazão (31,8L.s⁻¹) e abertura de 40% apresentou o máximo valor de carga de pressão, o qual foi de 207mm.c.a..

4.3 Comportamento das Pressões Extremas

O conhecimento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representando as pressões mínimas e 99,0% e 99,9%, representando as pressões máximas, possibilita que se tenha uma estimativa da tendência do valor mínimo e máximo que as pressões podem atingir, conforme Lopardo (1986). Apesar destas pressões ocorrerem durante uma pequena parcela do tempo, podem trazer danos às estruturas, portanto justifica-se o conhecimento destas pressões para o dimensionamento das estruturas hidráulicas.

As Figura 35 e Figura 36 apresentam o comportamento das pressões com 0,1% de probabilidade de não-excedência, para as aberturas de 30 e 50%, respectivamente, as demais aberturas encontram-se no Apêndice E.

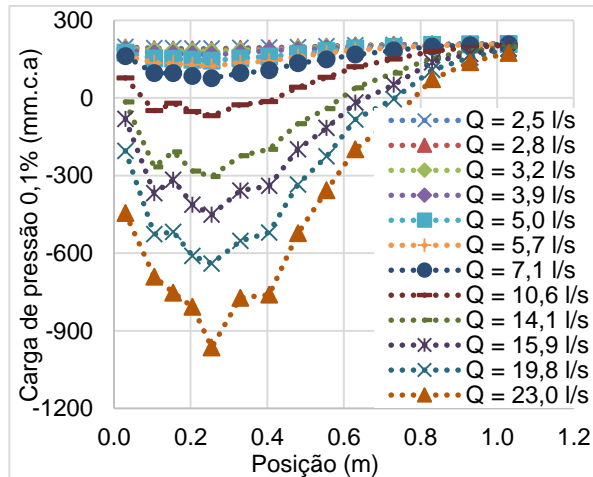


Figura 35 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30%

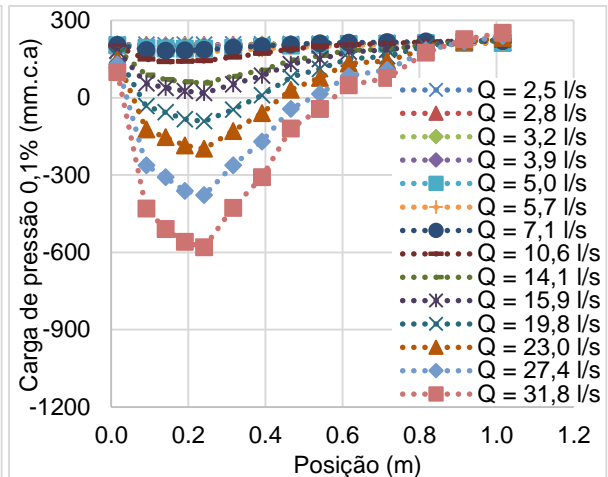


Figura 36 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 50%

As pressões com probabilidade de 0,1% de não-excedência se comportam de modo semelhante às pressões médias, porém com pressões ainda menores, exceto para as aberturas 80 e 90%, onde os valores de pressão são praticamente iguais. Para as aberturas entre 10 e 70% as menores cargas de pressões ocorrem logo após a comporta. Estas diminuem até determinada distância, a qual depende da abertura da comporta, estando em torno de 0,25m. Após esta posição a carga de pressão cresce gradualmente até estabilizar-se em torno de 200mm.c.a. para as menores vazões e aberturas chegando a 300mm.c.a. para as maiores vazões e aberturas, a uma distância de 0,60 a 0,80m a partir da borda da comporta, mostrando a interferência que a comporta exerce, principalmente para as maiores vazões.

Nas aberturas de 30 e 40% constam as menores pressões de 0,1% de probabilidade de não-excedência e a maior área de influência destas pressões, cerca de 0,80m, sendo esta situação mais crítica de funcionamento do sistema para as vazões ensaiadas, corroborando com os resultados de Abreu (2014) e Santos (2015). Já Kempka (2014) encontrou a menor pressão com 0,1% de probabilidade de não-excedência para a abertura de 10%. Porém, analisando a maior vazão ensaiada para a abertura de 10% ($7,1 \text{ L.s}^{-1}$) esta apresenta pressões inferiores as pressões encontradas para as aberturas superiores. A abertura de 20% também apresenta valores de carga de pressão baixos, comparando as mesmas vazões ensaiadas com as aberturas de 30 e 40%.

O comportamento das pressões com 0,1% de probabilidade de não-excedência para a abertura de 50% segue o mesmo comportamento das aberturas anteriores,

porém com pressões relativamente maiores das apresentadas nas situações mais críticas de funcionamento do sistema. Para as aberturas de 60 e 70% a área influenciada pela comporta passa a reduzir.

Na abertura de 30% foi registrado uma carga de pressão de -965mm.c.a. gerada por uma vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e na abertura de 40% foi registrada uma carga de pressão de -1164mm.c.a. gerada por uma vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$.

Nas Figura 37 e Figura 38 estão apresentados o comportamento das pressões com probabilidade de 0,1% de não-excedência para as vazões de $7,1\text{L.s}^{-1}$ e $23,0\text{L.s}^{-1}$, as demais vazões encontram-se no Apêndice F.

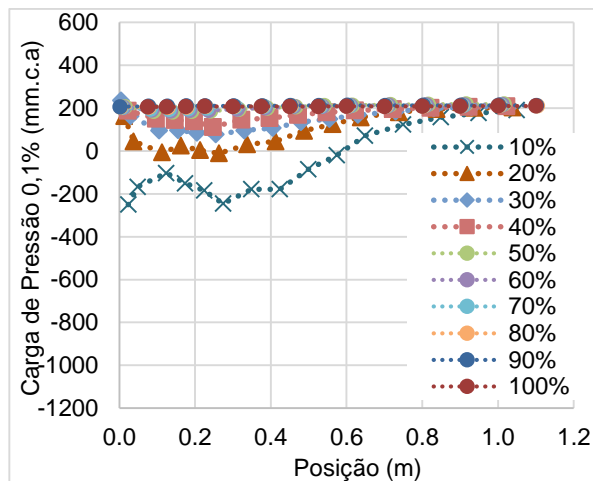


Figura 37 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão $7,1\text{L.s}^{-1}$

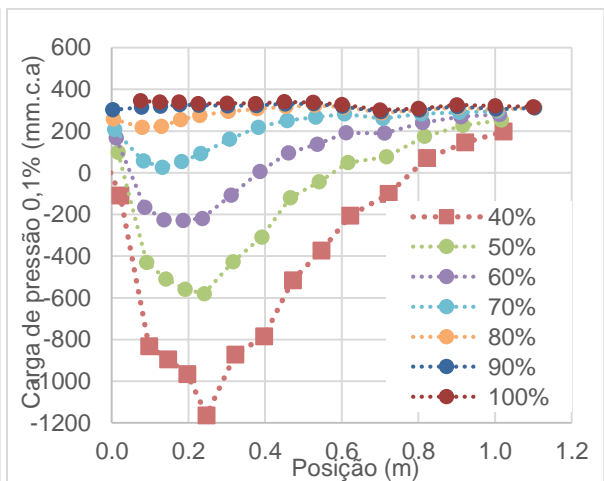


Figura 38 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão $31,8\text{L.s}^{-1}$

As pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% agrupadas por vazões comportam-se de maneira similar ao comportamento das pressões médias, como pode-se visualizar nas Figura 37 e Figura 38. As menores pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1% ocorrem logo à jusante da comporta, onde estas diminuem a uma distância de em torno de 0,25m da borda da comporta, após crescem até uma distância de 0,60 a 0,80m, a qual difere para cada vazão e abertura da comporta, até se estabilizarem em torno 200mm.c.a. para as menores vazões, chegando a 300mm.c.a. para as vazões mais altas, onde a comporta não exerce mais influência significativa no escoamento. Assim as cargas de pressão ficam praticamente constantes, exercendo apenas o efeito da perda de carga linear.

Para uma mesma vazão as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ocorrem para as menores aberturas e conforme aumenta a

vazão as pressões mínimas vão diminuindo. A situação mais crítica, ou seja, a menor pressão mínima, a partir dos dados experimentais ensaiados foi de -1164mm.c.a. para a vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$ e grau de abertura da comporta de 40%.

As pressões mínimas para a abertura de 10% apresentaram grande instabilidade para as vazões ensaiadas. As vazões de $2,5$ a $7,1\text{L.s}^{-1}$ apresentaram os menores valores de carga de pressão. A partir da vazão de $5,0\text{L.s}^{-1}$ encontrou-se valores negativos de carga de pressão mínima. A vazão de $7,1\text{L.s}^{-1}$ para a abertura de 10% apresentou valores próximos aos valores de carga de pressão mínima que ocorreram para a vazão de $10,6\text{L.s}^{-1}$ para a abertura de 20%, visto que a partir da vazão de $10,6\text{L.s}^{-1}$ não foi possível realizar ensaio devido ao extravasamento de água pela chaminé de equilíbrio.

O comportamento das pressões mínimas com 1,0% de probabilidade de não-excedência para as aberturas de 10 a 90% encontram-se no Apêndice G e comportamento das pressões mínimas com 1,0% de probabilidade de não-excedência para as vazões de $2,5\text{L.s}^{-1}$ a $31,8\text{L.s}^{-1}$ encontram-se no Apêndice H, estas apresentam o mesmo comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1%, onde a região mais crítica é próxima a comporta.

Do mesmo modo que para a pressão média e a pressão com probabilidade de não-excedência de 0,1%, as aberturas de 30 e 40% encontram-se as pressões mais críticas. Na abertura de 30% foi registrado uma carga de pressão de -864mm.c.a. gerada por uma vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e na abertura de 40% foi registrada uma carga de pressão de -1063mm.c.a. gerada por uma vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$.

As Figura 39 e Figura 40 apresentam o comportamento das pressões com 99,9% de probabilidade de não-excedência, para as aberturas de 30 e 50%, respectivamente, as demais aberturas encontram-se no Apêndice K.

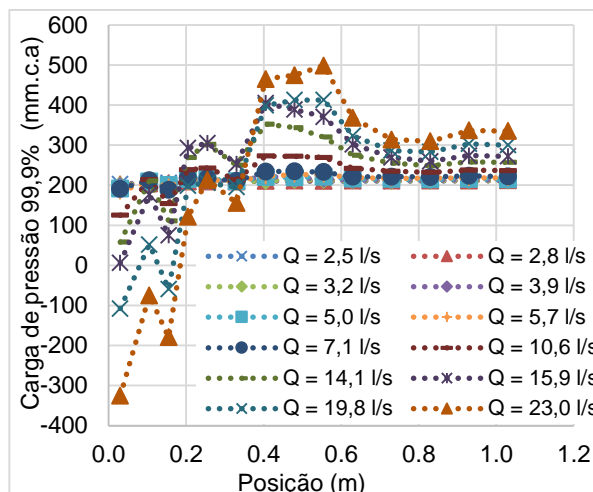


Figura 39 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura 30%

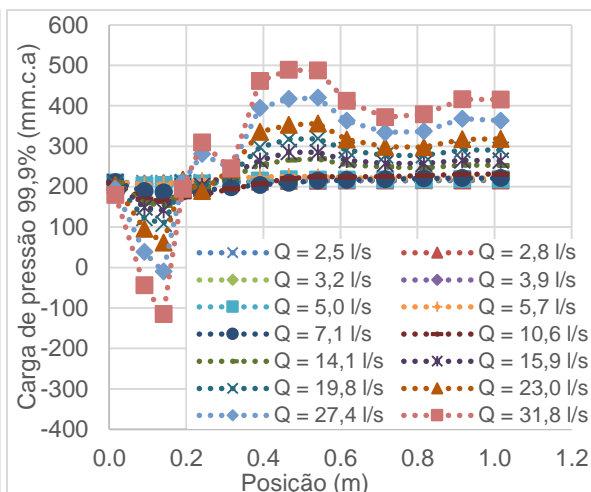


Figura 40 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura 50%

Analisando o comportamento das cargas de pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9%, verifica-se que esta segue o mesmo comportamento das pressões médias e mínimas. Onde na região logo a jusante da comporta, apresentam-se as menores pressões, principalmente para as maiores vazões, até determinada distância, de aproximadamente 0,15m, depois as pressões crescem até uma distância longitudinal de 0,40m a jusante da comporta para as maiores vazões, onde apresentam-se as maiores cargas de pressão e logo após estabilizam em torno de 300 a 600mm.c.a., já para as menores vazões as pressões estabilizam-se após a distância em torno de 0,20m, em torno de 200mm.c.a..

Nas aberturas de 10, 20 e 30% verifica-se uma maior dispersão das pressões na região próxima a comporta. As aberturas com maiores carga de pressão foram 30 e 40%, apresentando pressões de 498mm.c.a. para a vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e 594mm.c.a. para a vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$ respectivamente.

Nas Figura 41 e Figura 42 estão apresentados o comportamento das pressões com probabilidade de 99,9% de não-excedência para as vazões de $7,1\text{L.s}^{-1}$ e $31,8\text{L.s}^{-1}$, as outras vazões encontram-se no Apêndice L.

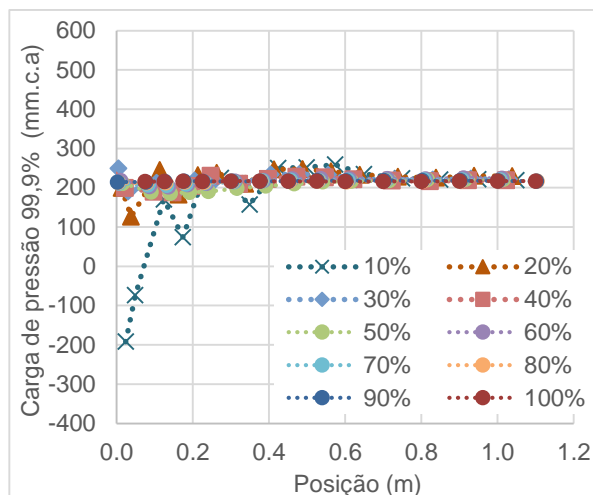


Figura 41 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 7,1 l/s

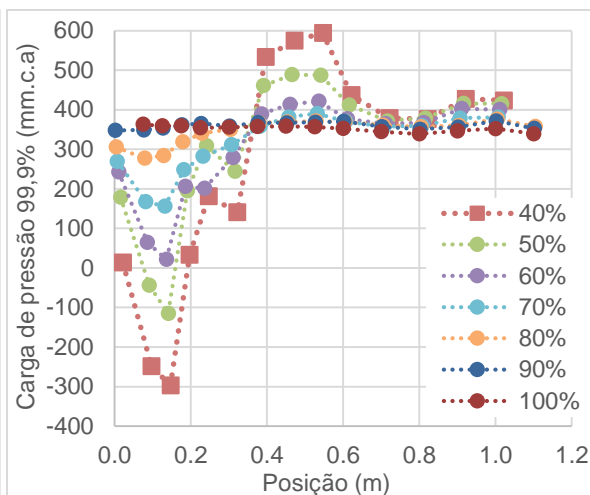


Figura 42 - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão 31,8 l/s

Para as menores vazões, entre $2,5$ a $7,1 \text{ L.s}^{-1}$, as cargas de pressões são constantes em torno de 200 mm.c.a. para todos os pontos de medição a jusante da comporta, porém para a abertura de 10% as pressões possuem maior instabilidade, onde os primeiros pontos, cerca de $0,40 \text{ m}$, apresentaram valores de carga de pressão baixos em comparação com as outras aberturas. Para as aberturas de 20 e 40%, cerca de $0,25 \text{ m}$ a jusante da comporta há um ponto de medição com máxima carga de pressão para algumas vazões.

A partir da vazão de $10,6 \text{ L.s}^{-1}$ as cargas de pressão começam a ser instáveis para todas as aberturas, sendo que as menores pressões com 99,9% de probabilidade de não-excedência ocorrem logo a jusante da comporta a uma distância de aproximadamente $0,15 \text{ m}$, posteriormente para as menores aberturas as pressões crescem gradualmente até a carga de pressão entre 250 a 600 mm.c.a. , atingindo a máxima carga de pressão a uma distância de $0,55 \text{ m}$, variando conforme a vazão, e estabiliza a uma distância de em torno de $0,70 \text{ m}$. A carga de pressão de estabilização cresce conforme aumenta a vazão, chegando até a carga e de pressão de 600 mm.c.a. .

A maior carga de pressão encontrada foi de 594 mm.c.a. para a vazão de $31,8 \text{ L.s}^{-1}$ e abertura de 40%.

O comportamento das pressões máximas com 99,0% de probabilidade de não-excedência para as aberturas de 10 a 90% encontram-se no Apêndice I e comportamento das pressões máximas com 99,0% de probabilidade de não-excedência para as vazões de $2,5 \text{ L.s}^{-1}$ a $31,8 \text{ L.s}^{-1}$ encontram-se no Apêndice J. Este

comportamento é muito semelhante as cargas de pressão máxima com 99,9% de probabilidade de não-excedência, porém com valores de pressão menores, onde na região logo a jusante da comporta, apresentam-se as menores pressões, a uma distância de aproximadamente 0,15m. Esta região é maior para as pressões máximas com 99,0% de probabilidade de não-excedência, de aproximadamente 0,40m, depois as pressões crescem até uma distância longitudinal de 0,60m a jusante da comporta para as maiores vazões, atingindo valores máximos de carga de pressão, e estabilizam em torno de 300 a 400mm.c.a., já para as menores vazões as pressões estabilizam-se após a distância em torno de 0,40m, em torno de 200mm.c.a..

Novamente as aberturas mais críticas são 30 e 40%. Para a abertura de 30% a situação mais crítica foi para o primeiro ponto medido, o qual apresentou a menor carga de pressão, no valor de -341mm.c.a., também apresentou máxima carga de pressão, no valor de 363mm.c.a. a uma distância em torno de 0,55m, ambos para a vazão de $23,0 \text{ L.s}^{-1}$. Já para a abertura de 40% a menor pressão encontrada foi no terceiro ponto medido, no valor de -416mm.c.a., e máxima carga de pressão, no valor de 441mm.c.a., a uma distância em torno de 0,55m, ambos para a vazão de $31,8 \text{ L.s}^{-1}$.

Analisando o comportamento das pressões máximas com 99,0% de probabilidade de não-excedência agrupadas por vazões também apresenta-se muito similar com o comportamento das pressões máximas com 99,9% de probabilidade de não-excedência. Porém as pressões estabilizam a uma distância de 0,40m a jusante da comporta ao invés de 0,70m.

4.4 Adimensional de pressões médias

Com a aplicação da técnica de análise dimensional encontrou-se uma relação que caracterizou o comportamento da distribuição de pressões médias a jusante de comportas na base do conduto para cada abertura.

A partir da análise dos dados, verificou-se que as pressões médias na base do conduto a jusante da comporta são influenciadas pelo grau de abertura da comporta, e conseqüentemente, pela vazão e pela velocidade, além de ser influenciada por um afogamento. Salienta-se que para o cálculo do afogamento foi considerada a altura conjugada lenta de ressalto hidráulico formado em conduto forçado, calculado de acordo com Rajaratnam (1967), conforme Equação 9.

$$\frac{Y_L^*}{Y_R} = \frac{\left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*} + n^* \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{2n^*+1} - \frac{n^*+1}{n^*} F_R^2 \left[1 + \beta - \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*}\right]}{(1 + n^*) \left(\frac{D}{Y_R}\right)^{n^*}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

Y_L^* = altura conjugada lenta equivalente (m);

Y_R = altura conjugada rápida (m), considerada igual a abertura da comporta;

D = altura da seção transversal do conduto (m);

β = coeficiente aeração, ou seja, a razão entre a vazão líquida e a vazão de ar, considerada 0;

n^* = coeficiente de forma que vale 1 para condutos retangulares, 1,5 para condutos parabólicos e 2 para condutos triangulares.

Com base na análise das pressões médias, constataram-se comportamentos distintos em função da vazão e do grau de abertura da comporta. Desta forma, agruparam-se as vazões, para uma mesma abertura com tendências semelhantes, a partir do número de Reynolds superior a 140.000, o qual foi calculado considerando a altura do conduto e a velocidade média na seção da comporta.

Portanto, para os escoamentos com número de Reynolds superior a 140.000, o comportamento das pressões médias ao longo da base do conduto pode ser representado por um coeficiente adimensional de posição (X_{adm}) e por um coeficiente adimensional de pressão média (P_{adm}).

O coeficiente de posição (X_{adm}) relaciona a posição (x_i) dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta, e a altura do conduto (D), conforme a Equação 16.

$$X_{adm} = \frac{x_i}{D} \quad \text{Equação 16}$$

O coeficiente de pressão média (P_{adm}) foi calculado a partir da Equação 17.

$$P_{adm} = \frac{\frac{\bar{P}}{\gamma}}{\frac{v^2}{2g}} + \left(\frac{y_L}{D}\right)^{\alpha_{med}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

$\frac{\bar{P}}{\gamma}$ = carga de pressão média no ponto de medição;

v = velocidade média na seção da comporta;

g = aceleração da gravidade;

y_L = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico em conduto forçado, obtida a partir da Equação 9;

D = altura do conduto;

α_{med} = expoente para o adimensional de pressão média.

No coeficiente adimensional de pressão (Equação 17) foi aplicada a energia cinética média na seção sob a comporta mais uma segunda parcela, a qual considera um afogamento a jusante da comporta, utilizando a altura conjugada lenta, calculada para ressalto hidráulico em condutos forçados e no denominador a altura do conduto. A segunda parcela é elevada a um expoente (α_{med}), o qual varia para cada vazão, visando agrupar as pressões em uma única curva para cada abertura da comporta e número de Reynolds superior a 140.000. Os expoentes para cada vazão e abertura estão dispostos na Tabela 4. As condições de ensaio com número de Reynolds inferior a 140.000 não se ajustaram ao adimensional proposto, estando indicadas por “X” na Tabela 4. Já as vazões não ensaiadas apresentam o símbolo “-” na Tabela 4.

Tabela 4 – Expoente α_{med} para a Equação 17

| Vazão (l/s) | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|-------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| 2.5 | 10.00 | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 2.8 | 3.50 | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 3.2 | 2.00 | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 3.9 | 1.00 | 20.00 | X | X | X | X | X | X | X |
| 5.0 | 0.90 | 0.80 | X | X | X | X | X | X | X |
| 5.7 | 0.70 | 0.10 | 18.00 | X | X | X | X | X | X |
| 7.1 | 0.50 | 3.40 | 1.00 | 1.00 | X | X | X | X | X |
| 10.6 | - | 1.00 | 1.85 | 7.00 | X | X | X | X | X |
| 14.1 | - | - | 1.10 | 2.50 | 2.70 | 1.00 | 1.00 | X | X |
| 15.9 | - | - | 0.95 | 1.95 | 2.10 | 1.90 | 4.40 | 1.00 | X |
| 19.8 | - | - | 0.72 | 1.35 | 1.45 | 1.60 | 3.00 | 4.70 | 1.00 |
| 23.0 | - | - | 0.60 | 1.10 | 1.15 | 1.35 | 2.30 | 3.60 | 4.70 |
| 27.4 | - | - | - | 0.90 | 0.95 | 1.05 | 1.75 | 2.65 | 4.20 |
| 31.8 | - | - | - | 0.77 | 0.80 | 0.90 | 1.40 | 2.10 | 3.40 |

A função que melhor adequou-se para representar a relação entre o coeficiente de pressão média (P_{adm}) e o coeficiente de posição (X_{adm}) para cada grau de abertura da comporta foi uma função polinomial de quarto grau, apresentada pela Equação 18.

$$P_{adm} = A + B \cdot \left(\frac{X_{adm}}{D}\right) + C \cdot \left(\frac{X_{adm}}{D}\right)^2 + D \cdot \left(\frac{X_{adm}}{D}\right)^3 + E \cdot \left(\frac{X_{adm}}{D}\right)^4 \quad \text{Equação 18}$$

As Figura 43 e Figura 44 apresentam a relação entre os coeficientes adimensionais de pressão e posição a partir dos dados experimentais para a base do conduto a jusante da comporta e as curvas ajustadas para as aberturas das comportas 10 e 40%, as demais abertura encontram-se no Apêndice M.

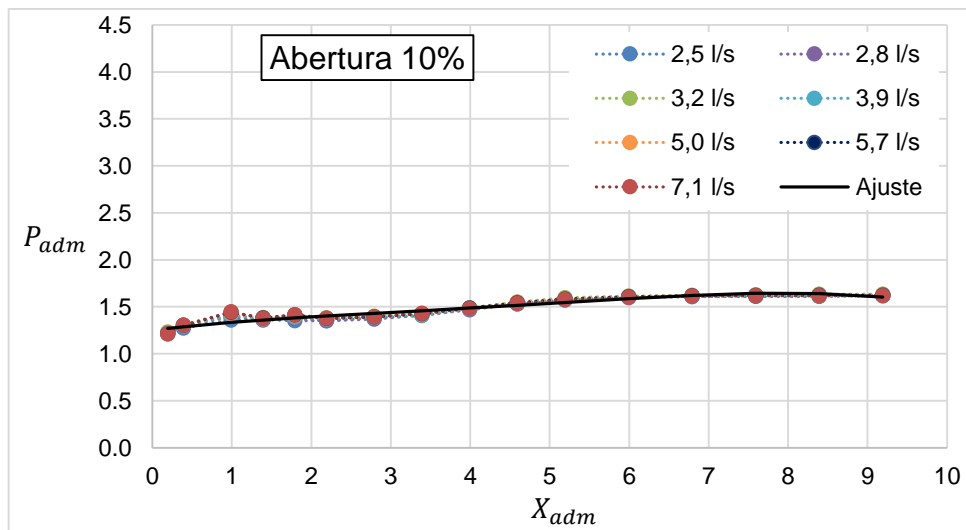


Figura 43 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 10%

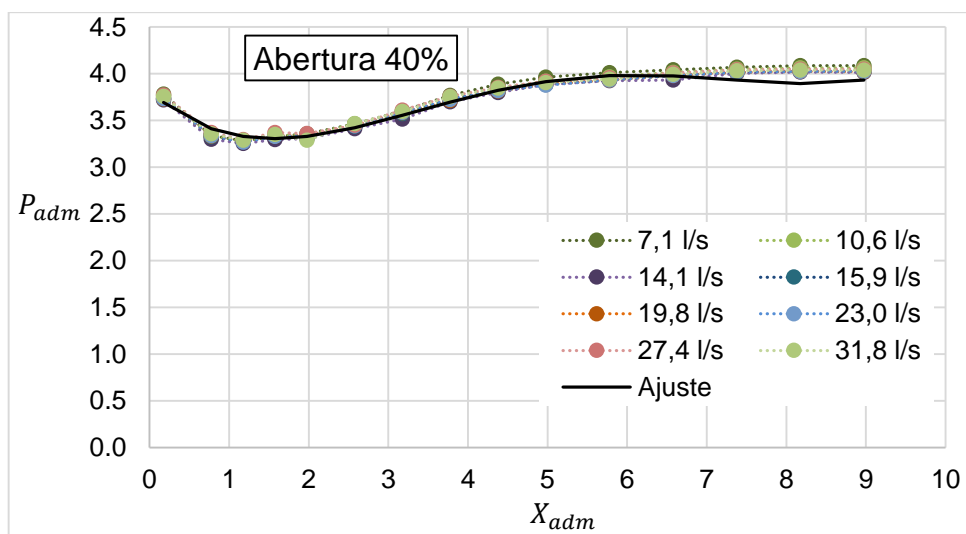


Figura 44 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 40%

Analisando as Figura 43 e Figura 44 juntamente com aquelas do Apêndice M pode-se perceber que os coeficientes de pressão média na base do conduto a jusante da comporta diminuem conforme aumenta a distância até certo ponto, onde os valores dos coeficiente passam a aumentar. Para o grau de abertura de 10% (Figura 43) o comportamento do coeficiente de pressão média para todas as vazões com número de Reynolds maior que 140.000 é mais suave, com isso a curva ajustada não seguiu a mesma tendência do conjunto de dados. As demais aberturas tiveram um bom ajuste de todo o conjunto de dados para a faixa de Reynolds indicada neste trabalho.

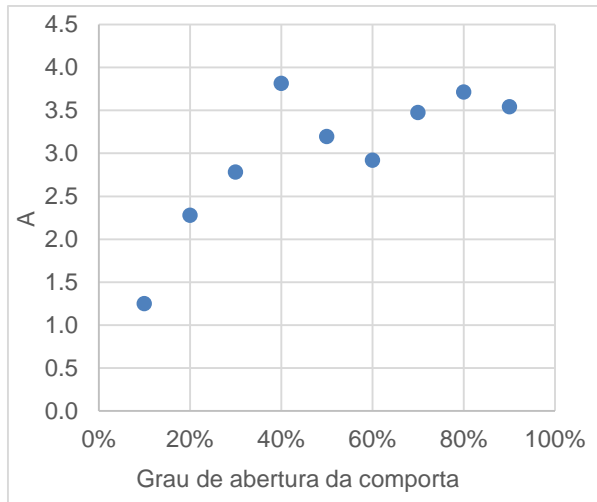
Os coeficiente (A, B, C D e E) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes para a Equação 13 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto

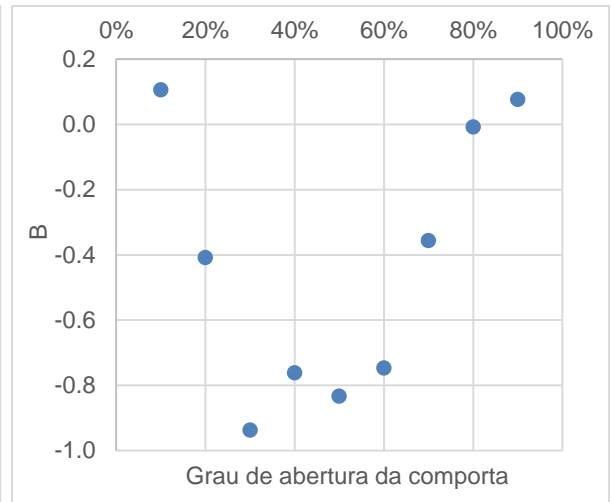
| Coeficientes | A | B | C | D | E | Coeficiente de Correlação |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|
| 10% | 1.2487 | 0.1064 | -0.0250 | 0.0044 | -0.0003 | 0.96 |
| 20% | 2.2778 | -0.4078 | 0.1961 | -0.0281 | 0.0013 | 0.75 |
| 30% | 2.7832 | -0.9368 | 0.4036 | -0.0574 | 0.0027 | 0.93 |
| 40% | 3.8144 | -0.7615 | 0.3525 | -0.0512 | 0.0024 | 0.99 |
| 50% | 3.2102 | -0.8333 | 0.3995 | -0.0605 | 0.0030 | 0.96 |
| 60% | 2.9203 | -0.7465 | 0.3908 | -0.0617 | 0.0031 | 0.97 |
| 70% | 3.4763 | -0.3564 | 0.2309 | -0.0397 | 0.0021 | 0.94 |
| 80% | 3.7141 | -0.0074 | 0.0530 | -0.0118 | 0.0007 | 0.91 |
| 90% | 3.5425 | 0.0769 | -0.0189 | 0.0014 | -2.0E-05 | 0.80 |

As equações ajustadas para cada grau de abertura da comporta apresentaram coeficientes de correlação com os dados experimentais altos, sendo que os menores valores de coeficiente de correlação encontrados foram de 0,80 e 0,91 para o grau de abertura de 90% e 80%, respectivamente.

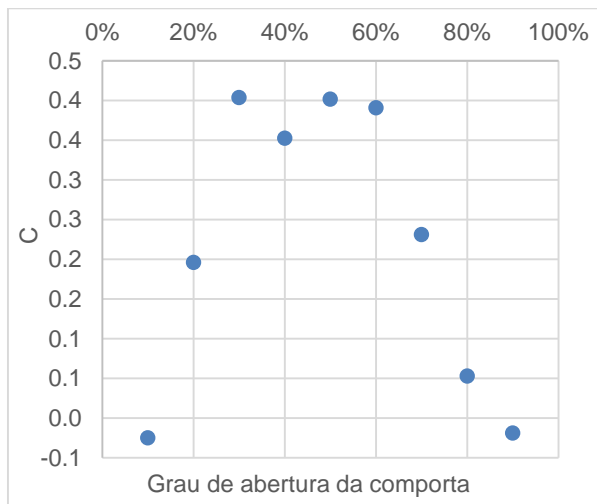
Os coeficientes da Equação 18, apresentados na Tabela 5, variam conforme o grau de abertura da comporta, como mostra a Figura 45.



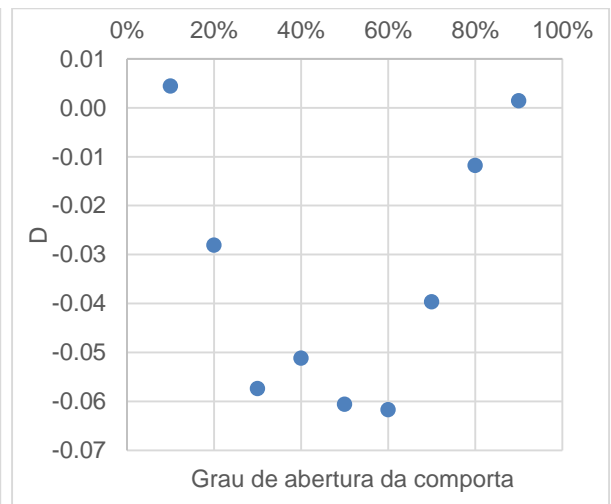
(a)



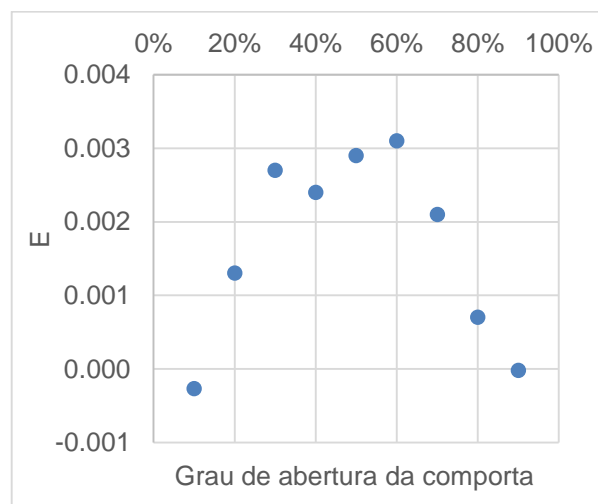
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 45 - Relação entre os coeficientes da Equação 18 e o grau de abertura da comporta, (a) coeficiente A, (b) coeficiente B, (c) coeficiente C, (d) coeficiente D e (e) coeficiente E

O coeficiente A vai aumentando conforme aumenta a abertura da comporta até um valor constante da ordem de 3,5 para as aberturas maiores. Os coeficientes B e D diminuem até a abertura de 30% e a partir da abertura de 70% aumenta até valores próximos de zero. O contrário acontece para os coeficientes C e E, para as aberturas próxima a comporta o coeficiente é próximo de zero e após aumenta até a abertura de 30% e diminui a partir da abertura de 70%.

4.5 Adimensional de pressão flutuante

Para a representação das flutuações de pressão foi utilizada uma relação procurando caracterizar o comportamento da distribuição de pressões flutuantes a jusante de comportas na base do conduto para cada abertura e, assim auxiliar na predição de pressões extremas, juntamente com o coeficiente de pressão média. A Equação 19 representa o coeficiente de flutuação de pressão (σ_{adm}), onde relaciona a perda de carga localizada, o fator de submergência elevado a um expoente (α_{flu}) e um afogamento, considerando um ressalto hidráulico em conduto forçado, conforme descrito anteriormente.

$$\alpha_{adm} = \frac{\frac{\sigma_x}{\gamma}}{Ht} \cdot \frac{y_L}{D} \cdot \left(\frac{Tw}{y_L} \right)^{\alpha_{flu}} \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

$\frac{\sigma_x}{\gamma}$ = flutuação de pressão;

Ht = perda de carga da comporta;

y_L = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico em conduto forçado, obtida a partir da Equação 9;

D = altura do conduto;

Tw = carga de pressão sem influência da comporta, obtida a partir do piezômetro convencional 18 (Figura 23);

α_{flu} = expoente para o adimensional de flutuação de pressão.

A terceira parcela é elevada a um expoente (α_{flu}), o qual varia para cada vazão e abertura da comporta, para então agrupar as flutuações de pressões em uma única

curva para cada abertura da comporta. Os expoentes para cada vazão e abertura estão dispostos na Tabela 6. Em duas situações as curvas não ajustaram-se, isso devido o valor da perda de carga calculada ter sido nula, o que certamente indica algum problema na aquisição do dado de pressão que dá origem ao cálculo desta perda de carga. Estes dois casos estão representadas por um “X” e as vazões não ensaiadas apresentam “-” na Tabela 6.

Tabela 6 - Expoentes α_{flu} para a Equação 19

| Vazão (l/s) | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% |
|------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2.5 | 0.47 | 0.50 | 0.82 | 0.89 | 0.60 | 0.34 | 0.00 | 0.00 | 0.10 |
| 2.8 | 0.46 | 0.49 | 0.82 | 0.87 | 0.69 | 0.34 | 0.24 | 0.00 | 0.10 |
| 3.2 | 0.46 | 0.48 | 0.81 | 0.74 | 0.67 | 0.47 | X | 0.23 | 0.10 |
| 3.9 | 0.38 | 0.45 | 0.82 | 0.89 | 0.73 | 0.51 | 0.41 | 0.41 | 0.00 |
| 5.0 | 0.28 | 0.40 | 0.81 | 0.88 | 0.74 | 0.50 | 0.48 | 0.21 | 0.11 |
| 5.7 | 0.21 | 0.37 | 0.81 | 0.88 | 0.55 | 0.54 | 0.50 | 0.31 | 0.12 |
| 7.1 | - | 0.30 | 0.78 | 0.88 | X | 0.54 | 0.54 | 0.42 | 0.50 |
| 10.6 | - | 0.00 | 0.72 | 0.86 | 1.05 | 0.59 | 0.81 | 0.70 | 0.70 |
| 14.1 | - | - | 0.52 | 0.82 | 0.60 | 0.54 | 0.80 | 0.82 | 0.90 |
| 15.9 | - | - | 0.41 | 0.78 | 0.55 | 0.49 | 0.79 | 0.82 | 0.95 |
| 19.8 | - | - | 0.34 | 0.67 | 0.43 | 0.41 | 0.73 | 0.79 | 0.95 |
| 23.0 | - | - | - | 0.59 | 0.33 | 0.34 | 0.72 | 0.74 | 0.60 |
| 27.4 | - | - | - | 0.40 | 0.18 | 0.20 | 0.67 | 0.70 | 0.90 |
| 31.8 | - | - | - | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 0.70 | 0.90 |

O coeficiente de posição (X_{adm}) relaciona a posição (x_i) dos pontos de medição, a partir do terminal da comporta, e a altura do conduto (D), conforme a Equação 20:

$$X_{adm} = \frac{X_i}{D} \quad \text{Equação 20}$$

Para a base do conduto, a relação entre o coeficiente de flutuação de pressão (σ_{adm}) e o coeficiente de posição (X_{adm}) que melhor adequou-se, para cada grau de abertura da comporta foi a função racional (Equação 21):

$$\sigma_{adm} = \frac{a + bx_{adm}}{1 + cx_{adm} + dx_{adm}^2} \quad \text{Equação 21}$$

As Figura 46 e Figura 47 apresentam os dados experimentais adimensionais e as curvas ajustadas para representar relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto a jusante de comporta, para as demais aberturas encontram-se Apêndice N.

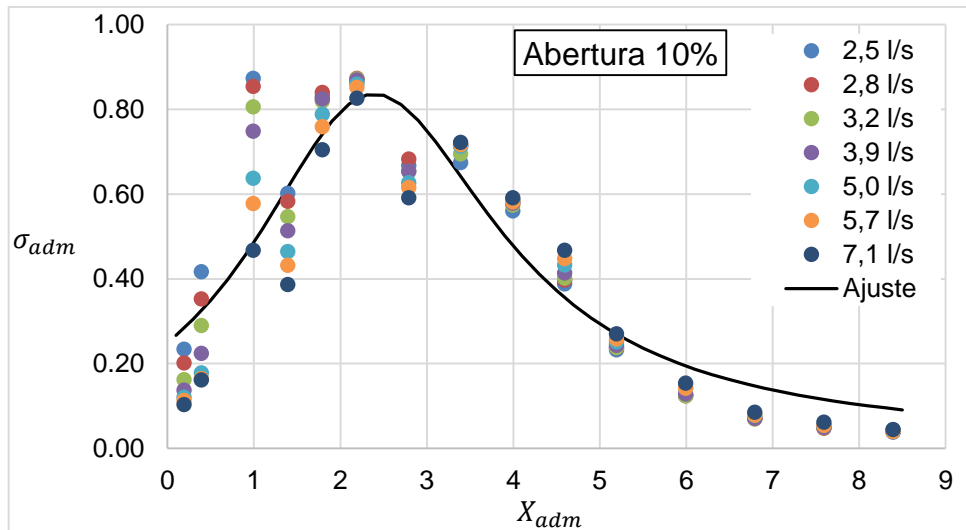


Figura 46 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 10%

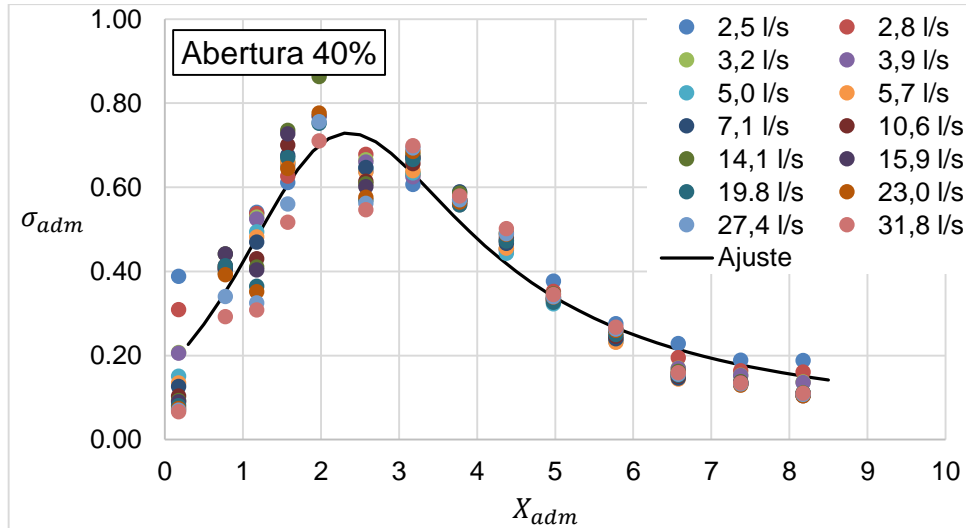


Figura 47 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 40%

Através da análise das Figura 46 e Figura 47 percebe-se que os coeficientes de flutuação de pressão na base do conduto a jusante da comporta aumentam conforme aumenta a distância até certo ponto, atingindo valores máximos. A partir deste ponto os valores começam a decrescer. Os coeficientes de flutuação de pressão até a posição adimensional 3 apresentaram uma grande variação conforme a vazão.

Para as aberturas 10% a 70% as curvas ajustaram-se bem aos dados experimentais, apesar das aberturas da comporta de 10, 20 e 30% não ajustarem-se bem no final do conjunto de dados. Já para as aberturas 80 e 90% a curva não representou o conjunto de dados adimensionais, visto que os mesmos apresentaram-se dispersos. Isso é o que se espera, pois para as maiores aberturas a perda de carga é pequena e a flutuação de pressão também é baixa, desta forma a parcela do adimensional de flutuação de pressão que dividi a flutuação de pressão no ponto pela perda de carga resulta em valores bem dispersos.

Os coeficientes de ajustes da Equação 21 estão apresentados na Tabela 7 juntamente com o seu coeficiente de correlação:

Tabela 7 – Coeficientes para a Equação 21 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto

| Coeficientes | a | b | c | d | Coeficiente de Correlação |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|
| 10% | 0.24995 | 0.02543 | -0.55551 | 0.12242 | 0.92 |
| 20% | 0.04966 | 0.02866 | -0.63643 | 0.21839 | 0.91 |
| 30% | 0.12109 | 0.05820 | -0.56640 | 0.15208 | 0.93 |
| 40% | 0.16628 | 0.08942 | -0.53328 | 0.13932 | 0.95 |
| 50% | 0.14959 | 0.08787 | -0.47012 | 0.13468 | 0.95 |
| 60% | 0.21912 | 0.05304 | -0.26712 | 0.09136 | 0.80 |
| 70% | 0.32261 | 0.38380 | 0.27186 | 0.13981 | 0.77 |
| 80% | 0.45557 | 0.16071 | 0.36868 | 0.01035 | 0.40 |
| 90% | 0.7229 | -0.0554 | 0.0153 | -0.0012 | 0.18 |

As equações ajustadas para representar o comportamento das flutuações ao longo da base do conduto apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,91 para as aberturas de 10, 20, 30, 40 e 50%. Para as aberturas de 60 e 70% o coeficiente de correlação foi de 0,80 e 0,77, ainda apresentando um coeficiente de correlação relativamente alto. Já as aberturas de 80 e 90% apresentaram um baixo coeficiente de correção de 0,40 e 0,18 devido à grande dispersão dos dados de flutuação de pressão, conforme explicado anteriormente.

Os coeficientes da Equação 21, apresentados na Tabela 7, variam conforme o grau de abertura da comporta, como mostra a Figura 45.

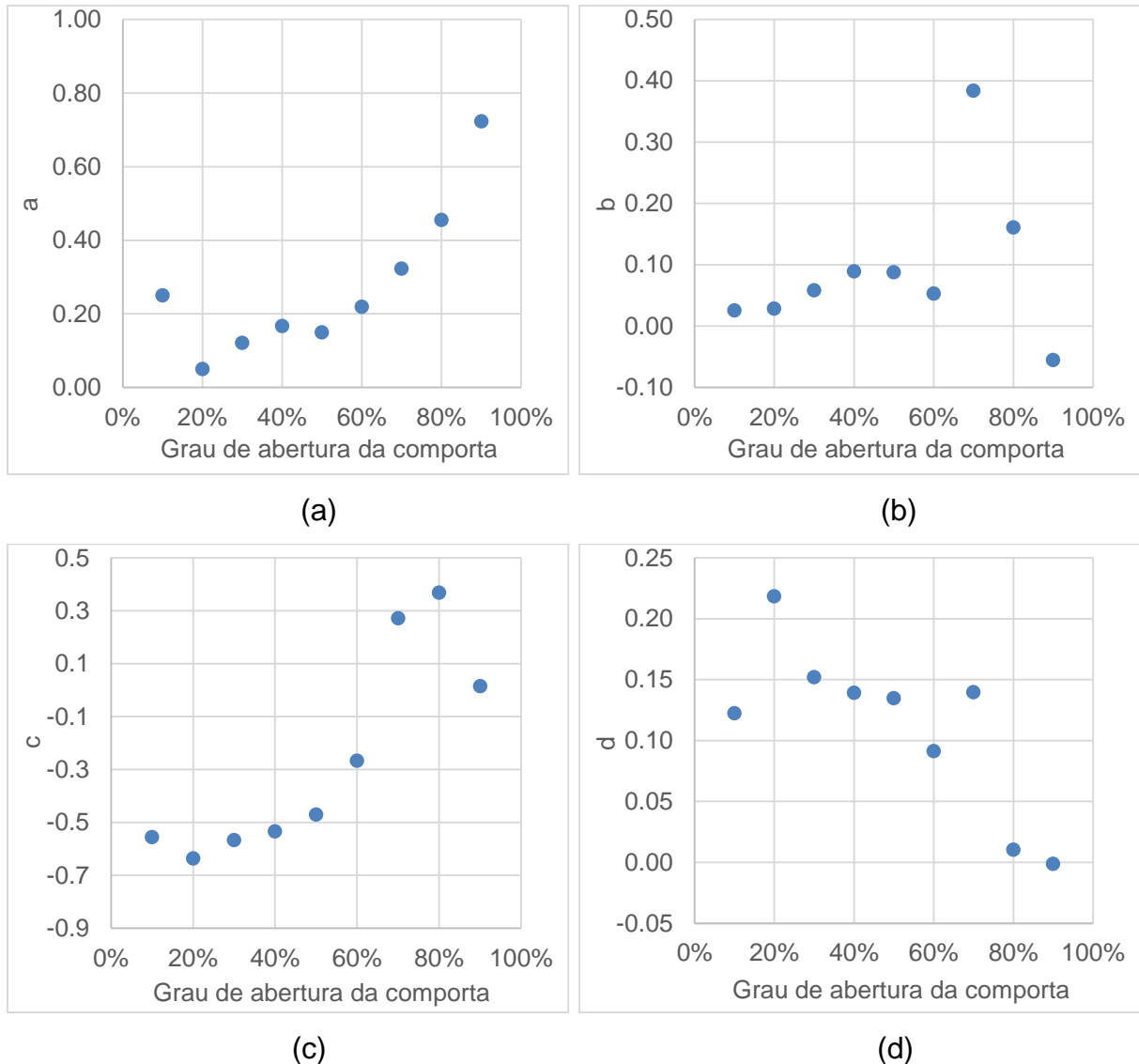


Figura 48 - Relação entre os coeficientes da Equação 21 e o grau de abertura da comporta, (a) coeficiente a, (b) coeficiente b, (c) coeficiente c e (d) coeficiente d

Os ajustes das curvas para representar a relação entre os coeficientes da Equação 21 e o grau de abertura da comporta, a partir de uma função racional. Os coeficientes b e d apresentaram baixos coeficientes de correlação, 0,51 e 0,76, respectivamente. Já para os coeficientes a e c, os coeficientes de correlação foram altos, com valores de 0,95 e 0,88, respectivamente. O comportamento dos coeficientes a e c são similares, onde tem-se valores de coeficientes que crescem rapidamente para as aberturas maiores que 60%, porém o valor do coeficiente c para a abertura de 90% diminuiu. Os valores do coeficiente b estão bem próximos de zero para praticamente todas as aberturas, exceto para as aberturas de 70% e 80%. E o comportamento do coeficiente d diminui até valores próximos de zero para as maiores aberturas.

4.6 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N)

Para estimativa das pressões com determinada probabilidade de não-excedência ($P_{x\%}$) atuantes junto a base de um conduto retangular a jusante de comporta, através da Equação 15 sugerida por Marques et al., (1997) é necessário o conhecimento das pressões médias (P_x) e das flutuações de pressão (σ_x) atuantes em cada ponto ao longo do conduto, esta última ponderada por um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N). Desta forma, determinou-se o coeficiente N associado as probabilidades de não-excedência de 0,1%, 1,0%, 99,0% e 99,9%, para assim ser possível a estimativa das pressões extremas.

4.6.1 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) para pressões mínimas 0,1% e 1,0%

As Figura 49 e Figura 50 apresentam os valores do coeficiente N das amostras de pressão obtidas para cada abertura da comporta associados às probabilidades de não-excedência de 0,1% para as aberturas de 10% e 30%. Os resultados para as demais aberturas encontram-se no Apêndice O. As Figura 51 e Figura 52 apresentam os coeficientes estatísticos associados às probabilidades de não-excedência de 1,0%, para as aberturas de 10% e 30%, as demais aberturas encontram-se no Apêndice P. No eixo das ordenadas encontra-se o coeficiente estatísticos de distribuição de probabilidades (N) e no eixo das abcissas encontra-se o coeficiente adimensional de posição, o qual representa a distância a partir da borda da abertura da comporta pela largura do conduto.

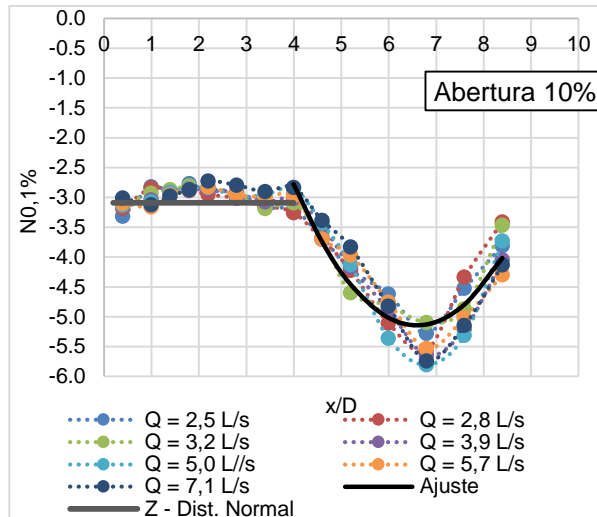


Figura 49 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 10%

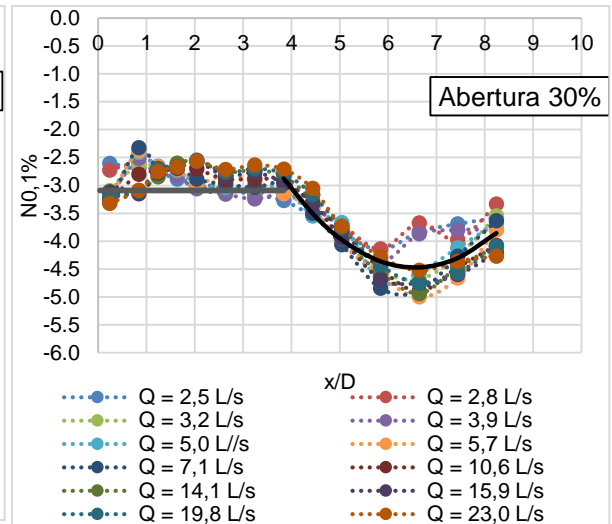


Figura 50 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 30%

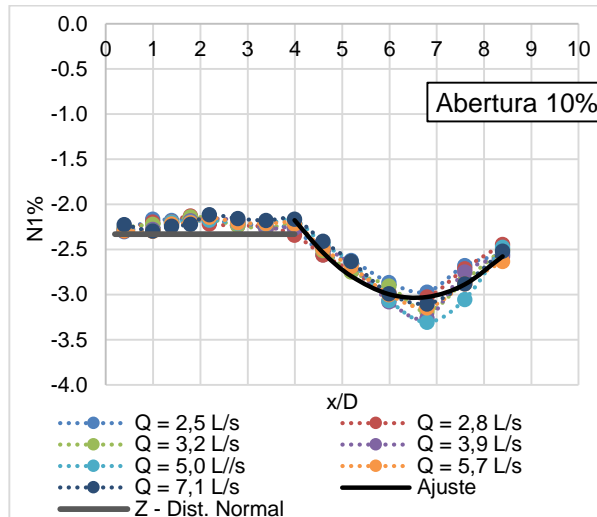


Figura 51 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 10%

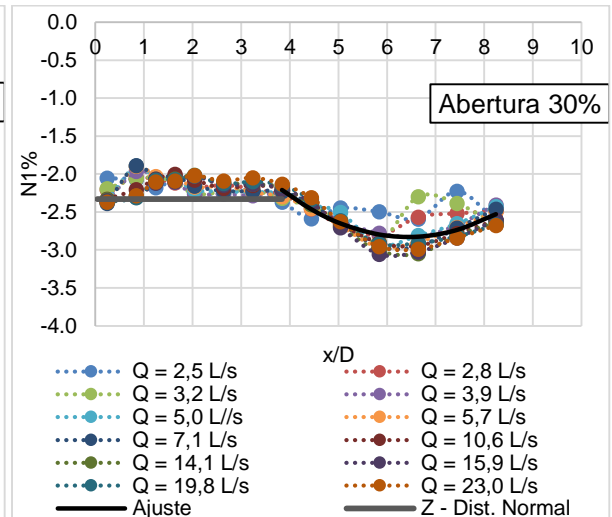


Figura 52 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 30%

Através da análise do comportamento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade $N_{0,1\%}$ e $N_{1,0\%}$ observa-se que de maneira geral os valores dos mesmos tornam-se estáveis em torno do valor -3,0 para o $N_{0,1\%}$, e, em torno de -2,0 para $N_{1,0\%}$ até a posição adimensional (x/D) < 4,0, este comportamento está próximo ao que se espera se o conjunto de dados seguisse uma distribuição normal de probabilidades, onde $Z_{0,1\%} = -3,09$ e o $Z_{1,0\%} = -2,33$. Com isso, pode-se indicar que para a região próxima a comporta, onde há contração do jato e a região de recirculação acima deste, os efeitos de compressão seriam mais intensos, e os dados aproximam-se bastante do comportamento de uma distribuição normal. À medida que o jato tende a se expandir o movimento ascensional do escoamento passa a reduzir os efeitos de compressão, tendo como reflexo a mudança no comportamento do

coeficiente N, sendo que a partir da posição adimensional (x/D) > 4,0, o coeficiente N começa a decrescer, atingindo seu valor mínimo em torno da posição adimensional 6,5, crescendo novamente.

Para as aberturas de comporta maiores, esta variação do coeficiente N vai suavizando e, a partir da abertura de 70%, o coeficiente N0,1% de probabilidade de não-excedência torna-se constante em torno no valor de -3,00 ($Z_{0,1\%} = -3,09$) e o coeficiente N1,0% de probabilidade de não-excedência torna-se constante em torno no valor de -2,0 ($Z_{1,0\%} = -2,33$).

A partir da posição adimensional (x/D) > 4,0 ajustou-se uma função de segundo grau (Equação 22) para representar a relação entre o coeficiente N0,1% e N1,0% e o adimensional de posição para cada grau de abertura da comporta. Os coeficiente (F, G e H) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais estão apresentados na Tabela 8 para o N0,1% e na Tabela 9 para o N1,0%:

$$N = F + G \cdot \left(\frac{x}{D}\right) + H \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^2 \quad \text{Equação 22}$$

Tabela 8 - Coeficientes para a Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade de 0,1% para a base do conduto

| Coeficientes | F | G | H | Coeficiente de Correlação |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------------------------|
| 10% | 10.0551 | -4.6088 | 0.3494 | 0.92 |
| 20% | 3.1286 | -2.4179 | 0.2012 | 0.72 |
| 30% | 4.8335 | -2.8393 | 0.2166 | 0.88 |
| 40% | 3.4099 | -2.2787 | 0.1699 | 0.87 |
| 50% | 0.1081 | -1.1140 | 0.0820 | 0.58 |
| 60% | 0.2079 | -1.1612 | 0.0898 | 0.45 |
| 70% | -2.8293 | -0.1313 | 0.0099 | 0.09 |
| 80% | -2.3344 | -0.2550 | 0.0195 | 0.21 |
| 90% | -2.7706 | -0.0989 | 0.0072 | 0.10 |

Tabela 9 Coeficientes para a Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade de 1,0% para a base do conduto

| Coeficientes | F | G | H | Coeficiente de Correlação |
|---------------------|----------|----------|----------|----------------------------------|
| 10% | 2.6399 | -1.7369 | 0.1329 | 0.93 |
| 20% | -0.1744 | -0.8477 | 0.0730 | 0.51 |
| 30% | 0.9783 | -1.1835 | 0.0920 | 0.82 |
| 40% | 0.7311 | -1.0658 | 0.0820 | 0.86 |
| 50% | -0.8729 | -0.4901 | 0.0367 | 0.55 |
| 60% | -0.8128 | -0.5207 | 0.0402 | 0.47 |
| 70% | -2.1816 | -0.0533 | 0.0035 | 0.12 |
| 80% | -2.0563 | -0.0960 | 0.0071 | 0.13 |
| 90% | -2.4250 | 0.0317 | -0.0026 | 0.06 |

O comportamento dos coeficientes (F, G e H) para os coeficiente estatísticos de probabilidade de 0,1% e 1,0% de não-excedência são similares, onde os coeficientes F e H decrescem e os coeficiente G crescem. A partir da abertura 70% os coeficiente tornam-se constantes, os coeficientes G e H em torno de 0 e o coeficiente F em torno de -2,00. Nas Figura 53 e Figura 54 é possível observar o comportamento dos coeficientes da Equação 22 (F, G e H) que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e o coeficiente $N_{0,1\%}$ e $N_{1\%}$, respectivamente, e, o grau de abertura da comporta.

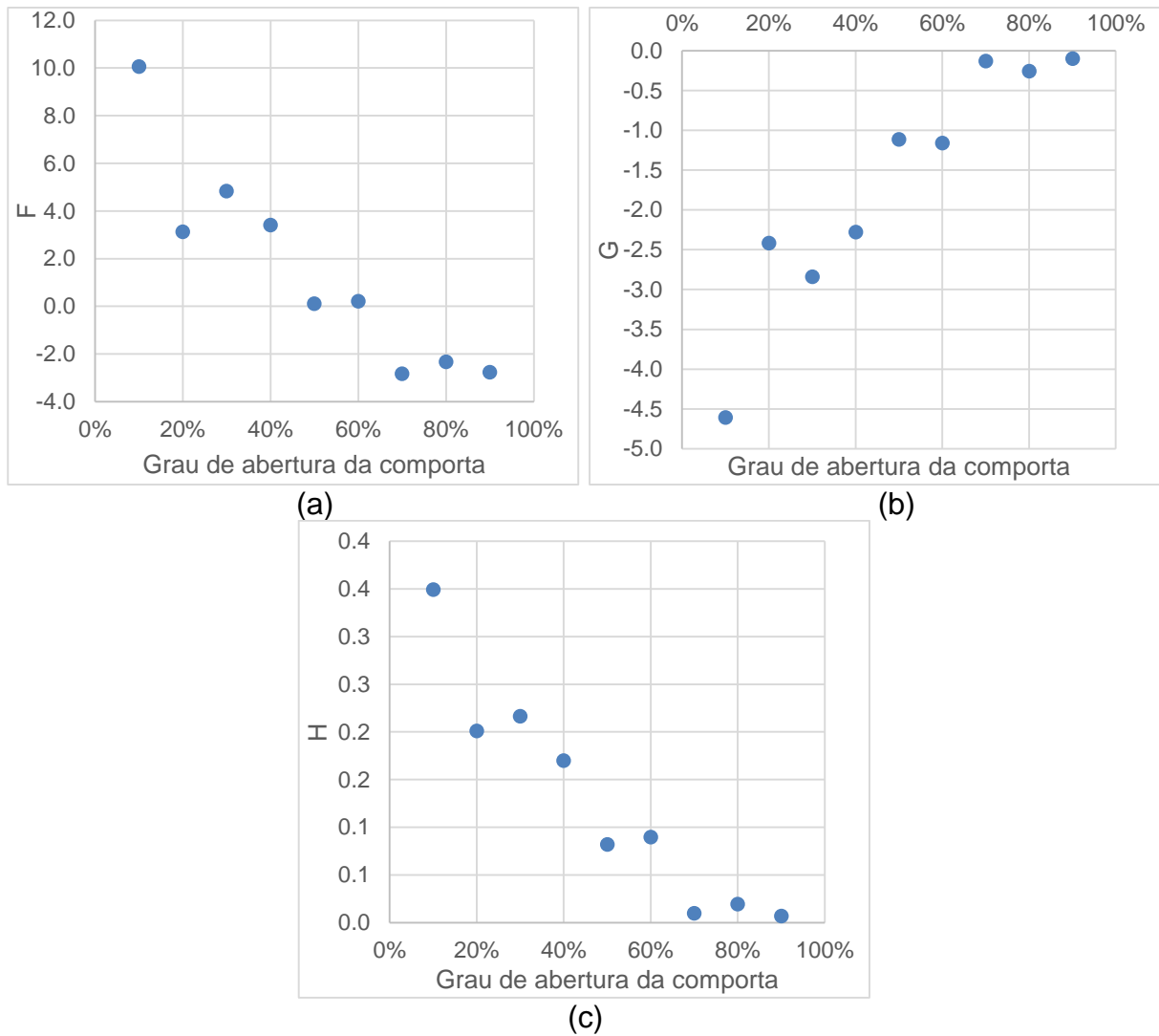


Figura 53 - Relação entre os coeficientes da Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e o coeficiente $N_{0,1\%}$ e o grau de abertura da comporta (a) coeficiente F, (b) coeficiente G e (c) coeficiente H

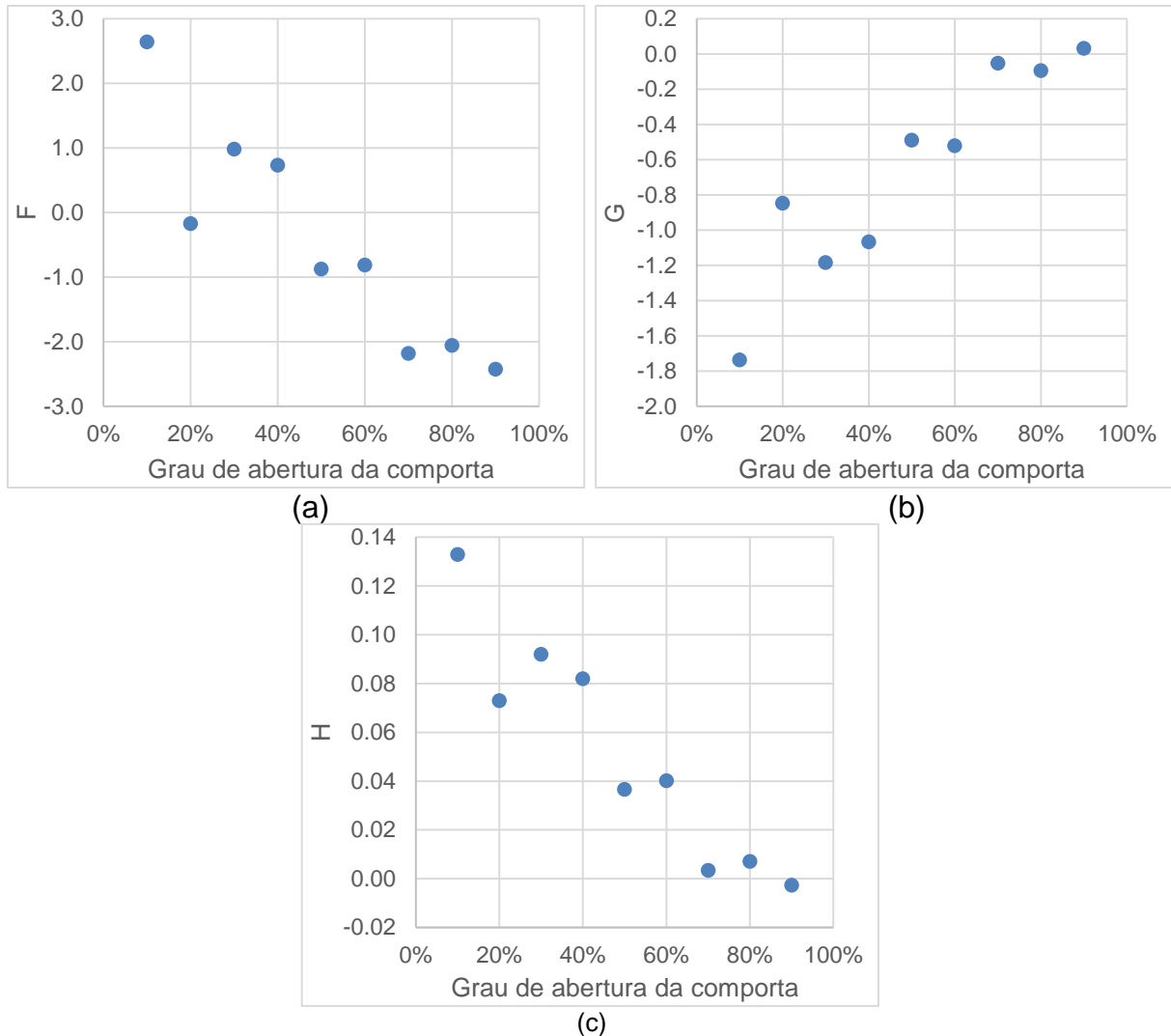


Figura 54 - Relação entre os coeficientes da Equação 22 que estabelece a relação entre os coeficientes adimensionais de posição ($x/D > 4$) e o coeficiente $N_{1\%}$ e o grau de abertura da comporta (a) coeficiente F , (b) coeficiente G e (c) coeficiente H

Os coeficientes F e H decrescem e os coeficiente G crescem para ambos coeficientes estatístico de probabilidade, $N_{0,1\%}$ e $N_{1\%}$, porém com valores diferentes.

4.6.2 Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidades (N) para pressões máximas 99,0% e 99,9%

As Figura 55 e Figura 56 apresentam os valores do coeficiente N das amostras de pressão obtidas para as aberturas da comporta de 10% e 30% associados às probabilidades de não-excedência de 99,0%, as demais aberturas encontram-se no Apêndice Q. E as Figura 57 e Figura 58 apresentam os coeficientes estatísticos associados às probabilidades de não-excedência de 99,9% para o grau de abertura

da comporta de 10% e 30%, as demais aberturas encontram-se no Apêndice R. No eixo das ordenadas encontra-se o coeficiente estatísticos de distribuição de probabilidades e no eixo das abscissas encontra-se o coeficiente adimensional de posição, o qual representa a distância a partir da borda da abertura da comporta pela largura do conduto.

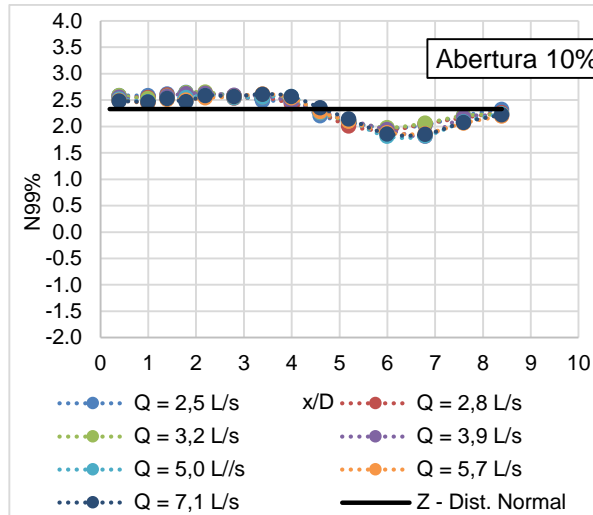


Figura 55 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 10%

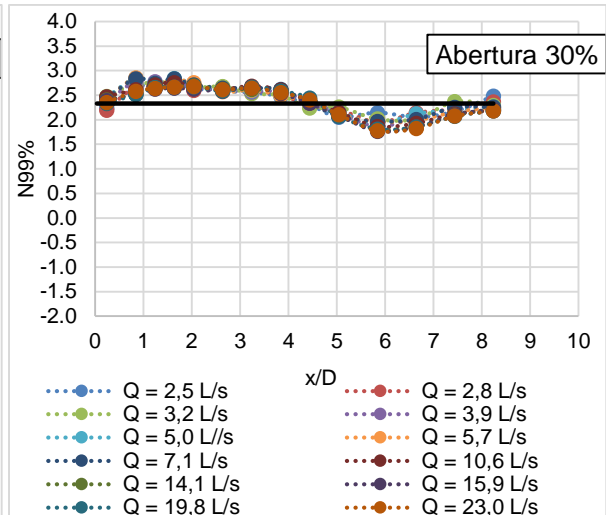


Figura 56 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 30%

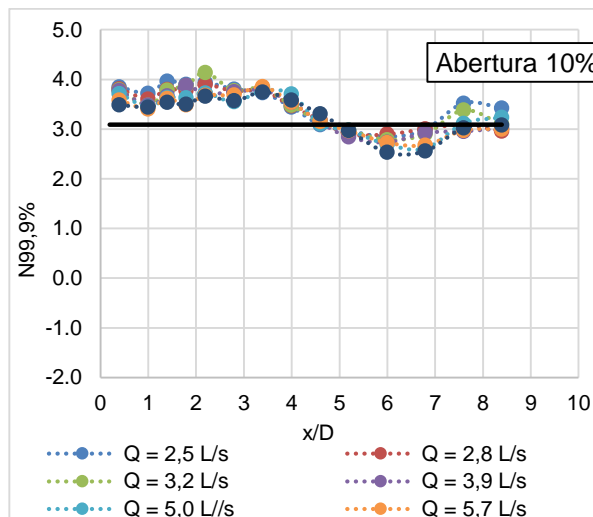


Figura 57 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 10%

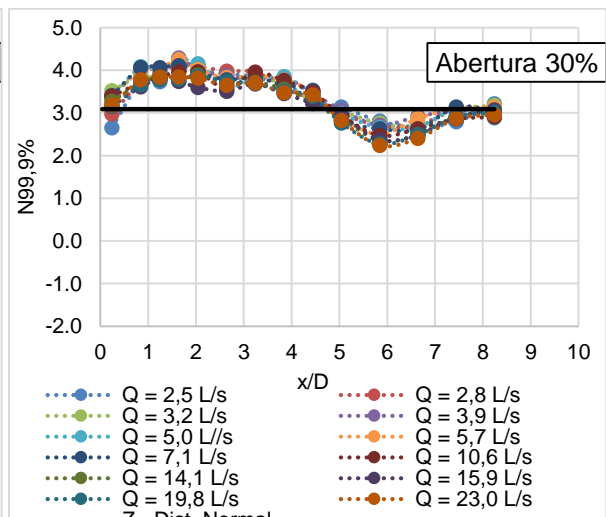


Figura 58 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 30%

O comportamento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade $N_{99,0\%}$ e $N_{99,9\%}$ de maneira geral é estável em torno do valor de 3,0 para $N_{99,0\%}$ em torno do valor 4,0 para $N_{99,9\%}$, até a posição adimensional (x/D) $< 4,0$, onde começa a decrescer, atingindo seu valor mínimo em torno da posição adimensional 6,0, onde volta a crescer. Ao contrário do que pode-se verificar nas pressões mínimas,

para as pressões máximas e menores aberturas não ocorreram valores próximos do que se espera de uma distribuição normal.

Conforme são analisadas aberturas de comportas maiores, a variação do coeficiente N vai suavizando e, a partir da abertura de 70%, o coeficiente de probabilidade de não-excedência torna-se constante em torno no valor de 2,33 ($Z_{99,0\%} = 2,33$) para $N_{99,0\%}$ e 3,09 de 2,33 ($Z_{99,0\%} = 3,09$) para $N_{99,9\%}$, valores correspondentes ao da distribuição normal.

Como para as pressões máximas não seguiu o mesmo comportamento das pressões mínimas, onde na região próxima a comporta não seguiu um comportamento próximo do que se espera de uma distribuição normal, não ajustou-se uma equação para a determinação nos coeficientes estatísticos de probabilidade de não-excedência.

4.7 Verificação dos adimensionais e ajustes propostos com dados de outro modelo

A fim de verificar a relação adimensional que caracterizou o comportamento da distribuição de pressões médias e flutuação de pressão e o coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade a jusante de comportas na base do conduto para os dados obtidos através da investigação experimental desenvolvida no modelo físico hidráulico, implantado no Laboratório de Hidráulica do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas, utilizou-se os adimensionais e as equações que caracterizam estes adimensionais, as quais foram propostas neste trabalho para os dados obtidos no modelo físico hidráulico, implantado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) – UFRGS.

Cabe ressaltar que não foi possível testar todas pressões resultantes dos ensaios para as vazões dispostas na Tabela 3, pois para algumas aberturas da comporta não foi possível ensaiar algumas vazões devido a limitação dos modelos.

4.7.1 Verificação do ajuste dos adimensionais de pressão média

As pressões médias com número de Reynolds superior a 140.000 tem o comportamento descrito pelos coeficientes adimensionais de posição (Equação 16) e de pressão média (Equação 17), desta forma os dados de pressão média verificados

neste item apresentavam número de Reynolds superior a 140.000. A segunda parcela da Equação 17 é elevada a um expoente (α_{med}), este expoente não variou em ambos modelos, com isso utilizou-se os mesmos expoentes para os dados da UFRGS, conforme a Tabela 4.

Ajustou-se as curvas de ajuste para o modelo da UFRGS através da Equação 18 e os coeficientes da Tabela 4 – Expoente α_{med} para a Equação 17 para cada abertura de comporta.

As Figura 59 e Figura 60 apresentam a relação entre os coeficientes adimensionais de pressão média e posição a partir dos dados experimentais da UFRGS para a base do conduto a jusante da comporta e as curvas ajustadas para as aberturas da comporta 10% e 40%, conforme os adimensionais propostos neste trabalho. As demais aberturas verificadas estão dispostas no Apêndice S.

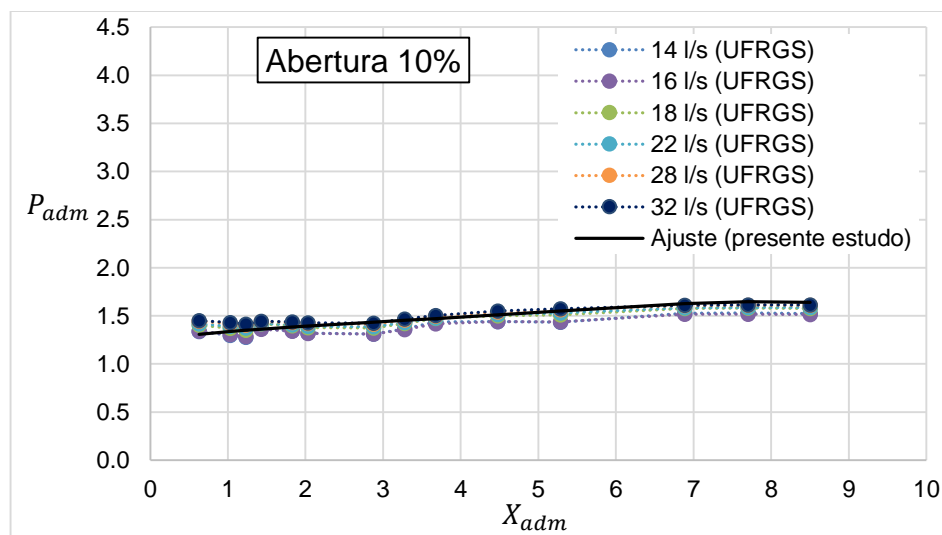


Figura 59 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10%

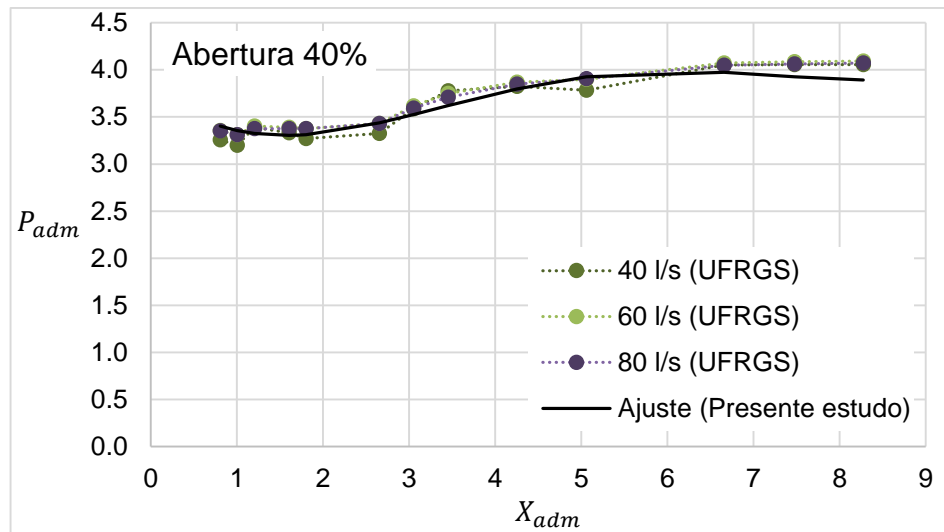


Figura 60 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40%

Analisando as Figura 59 e Figura 60 pode-se perceber que a relação entre os adimensionais de posição e de pressão média e a equação que representa esta relação a qual foram obtidas através dos dados do modelo físico da UFPel ajustaram-se bem para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS, inclusive com os mesmos expoentes (Tabela 4) propostos para a Equação 18.

Para as aberturas posteriores a 50% os dados de pressão média não foram ajustados, visto que para o modelo físico da UFPel as vazões que agruparam-se com número de Reynolds superior a 140.000 para as aberturas 60, 70, 80 e 90% eram superiores a vazão de $14,1 \text{ L.s}^{-1}$, correspondente a vazão de 80 L.s^{-1} para o modelo da UFRGS. Tanto que para a abertura de 50% apenas uma vazão (80 L.s^{-1}) foi ajustada, pois as outras vazões estão fora o intervalo de ajuste proposto neste estudo.

4.7.2 Verificação do ajuste dos adimensionais de flutuação de pressão

Para caracterizar o comportamento das flutuações de pressão a jusante de comportas na base do conduto para cada abertura foi proposto o coeficiente adimensional de flutuação de pressão, conforme descrito pela Equação 19 e o coeficiente adimensional de posição (Equação 20). Com o propósito de verificar estes coeficientes adimensionais, os mesmos foram calculados para os dados obtidos do modelo físico hidráulico da UFRGS e a curva de ajuste foi verificada para estes dados.

Para agrupar os coeficientes adimensionais de flutuação de pressão em uma única curva para cada abertura, as variáveis da terceira parcela da Equação 19 são

elevados a um expoente (α_{flu}), porém os expoentes propostos para os dados obtidos no modelo físico implantado na UFPel não ajustaram-se para os dados provenientes do modelo físico da UFRGS, desta forma foram propostos novos expoentes, os quais melhor ajustaram-se para o conjunto de dados da UFRGS e encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Expoentes para a Equação 19

| Vazão (L.s⁻¹) | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 14.0 | 3.80 | - | - | - | - | - | - |
| 16.0 | 4.20 | - | - | - | - | - | - |
| 18.0 | 4.60 | 1.00 | 1.50 | - | - | - | - |
| 22.0 | 5.70 | 0.90 | 1.80 | 1.50 | 0.40 | 0.10 | - |
| 32.0 | 23.00 | 1.00 | 2.30 | 2.10 | 1.10 | 0.70 | 0.01 |
| 40.0 | - | 1.00 | 2.70 | 2.40 | 1.40 | 1.20 | 0.30 |
| 60.0 | - | 1.00 | 5.00 | 3.40 | 1.80 | 1.80 | 1.20 |
| 80.0 | - | - | - | 6.30 | 2.20 | 2.10 | 1.60 |

Na Tabela 10 as vazões não ensaiadas e com dados insuficientes para o ajuste apresentam “-”.

Ajustou-se as curvas de ajuste para o modelo da UFRGS através da Equação 21 e os coeficientes da Tabela 6 para cada abertura de comporta.

As Figura 61 e Figura 62 apresentam a relação entre os coeficientes adimensionais de flutuação de pressão e posição para os dados experimentais da UFRGS para a base do conduto a jusante da comporta e as curvas ajustadas para as aberturas da comporta de 10% e 40%, conforme os adimensionais propostos neste trabalho. As demais aberturas encontram-se no Apêndice T - Verificação do ajuste adimensional de flutuação de pressão.

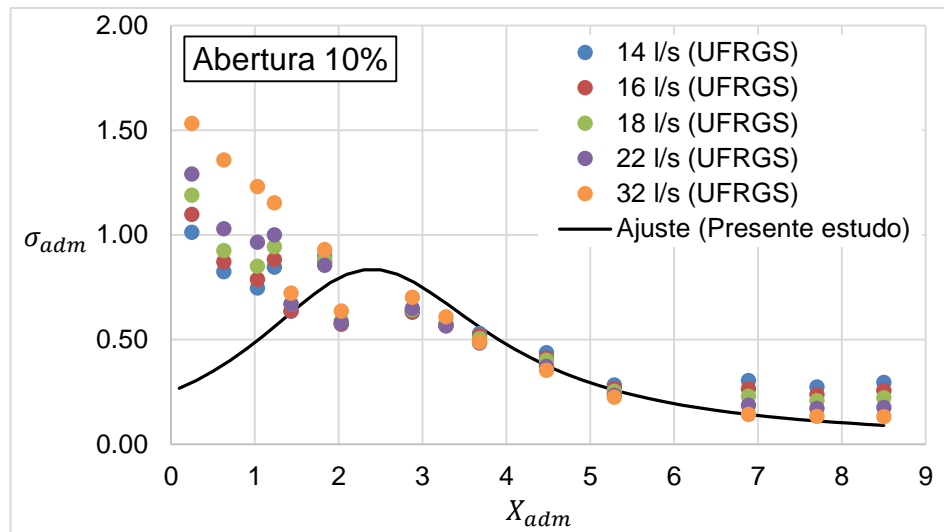


Figura 61 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10%

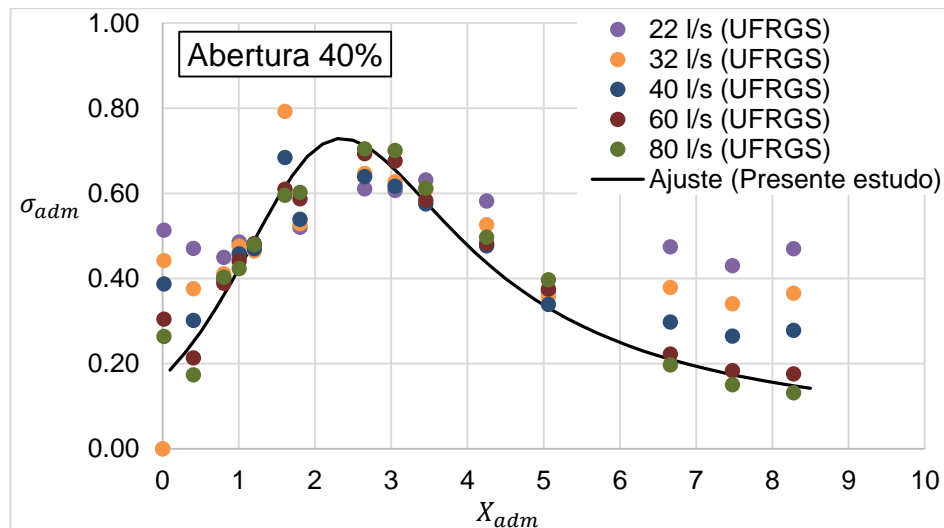


Figura 62 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40%

Analisando as Figura 61 e Figura 62 percebe-se que a relação entre os adimensionais de posição e de flutuação de pressão e a equação que representa esta relação, a qual foram obtidas através dos dados do modelo físico da UFPel, para grande parte dos dados de flutuação de pressão, obtidos no modelo físico hidráulico da UFRGS, referente ao grau de abertura da comporta e a vazão ensaiada ajustaram-se bem e apresentam um comportamento similar em ambos modelos.

Para a abertura de 10% (Figura 61) os coeficientes adimensionais de flutuação de pressão até a posição adimensional 2 não tem a mesma tendência do ajuste proposto nesta pesquisa, estando na parte superior da curva de ajuste. Os coeficientes adimensionais de flutuação de pressão para todas as aberturas e

menores vazões, a partir do adimensional de posição de 6,5 apresentaram uma maior dispersão da curva de ajuste. Para as aberturas de 60 e 70% os dados apresentaram-se mais dispersos ao longo de todo o coeficiente de posição.

4.7.3 Verificação do ajuste dos coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidades

A partir dos dados de pressão média, flutuação de pressão e os percentis 0,1% e 1,0%, determinou-se os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidade (N) associado as probabilidade de não-excedência de 0,1% e 1,0% para os dados obtidos no modelo físico hidráulico implantado na UFRGS e ajustou-se a curvas a partir da Equação 22 e os coeficientes (F, G e H) para o N0,1% (Tabela 8) e para o N 1,0% (Tabela 9) para o adimensional de posição (x/D) a partir de 4,0 e para cada grau de abertura da comporta proposta neste trabalho e ajustados a partir dos dados obtidos no modelo físico da UFPel. Nas Figura 63 e Figura 64 e Figura 65 e Figura 66 percebe-se o comportamento do coeficiente N0,1% e N1,0%, respectivamente, bem como a reta de ajuste da distribuição normal até a posição adimensional 4 e, posteriormente, as curvas de ajuste, para as aberturas de 10% e 40%. As demais aberturas encontram-se nos Apêndice U e Apêndice V.

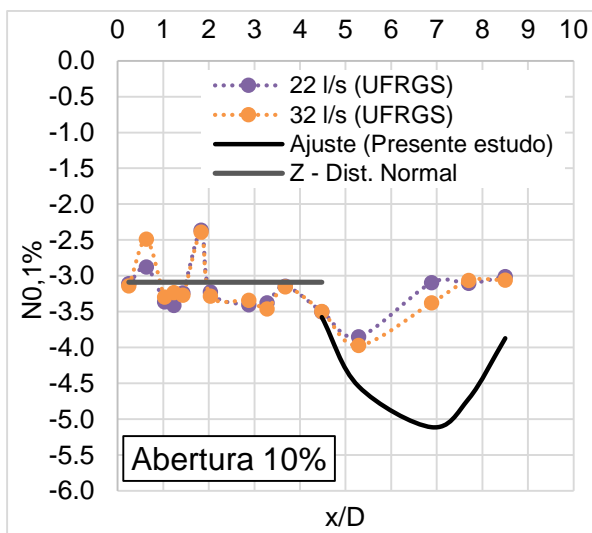


Figura 63 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

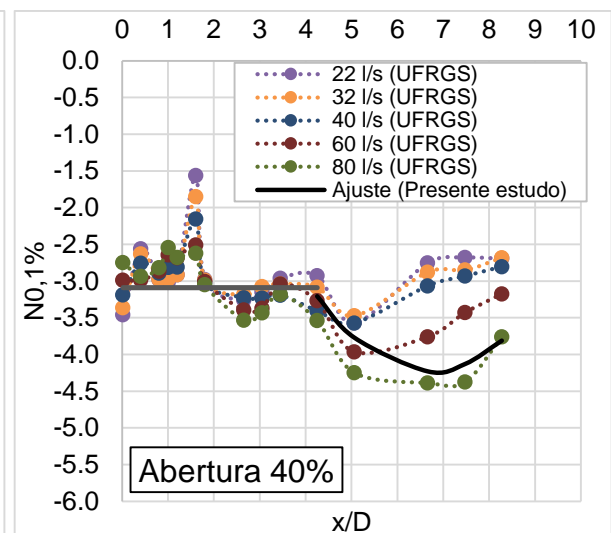


Figura 64 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

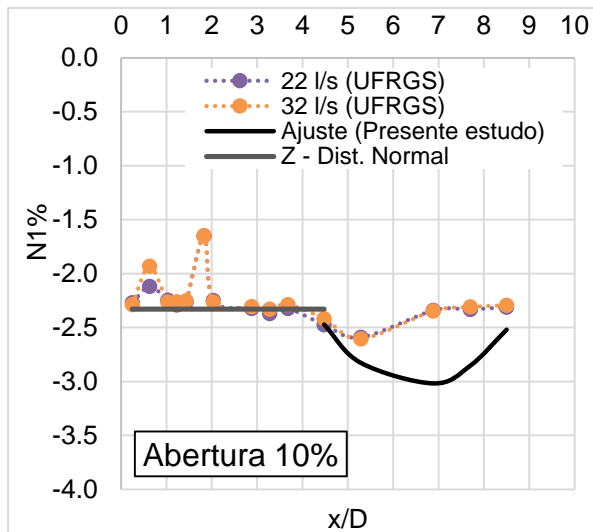


Figura 65 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

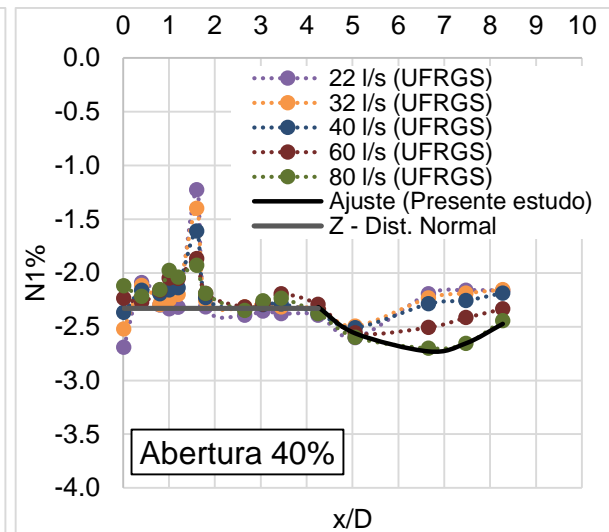


Figura 66 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

Através da análise do comportamento do coeficiente estatístico de probabilidade $N_{0,1\%}$ (Figura 63 e Figura 64) e $N_{1,0\%}$ (Figura 65 e Figura 66) para os dados obtidos da modelo físico da UFRGS, observa-se que de maneira geral os valores de $N_{0,1\%}$ e $N_{1,0\%}$ ajustaram-se bem equações propostas nesta pesquisa e também seguem um comportamento próximo ao que se espera de uma distribuição normal de probabilidades, onde $Z_{0,1\%} = -3,09$ e o $Z_{1,0\%} = -2,33$, apresentando valores estáveis até o adimensional de posição 4,0, com exceção de alguns picos, que pode evidenciar problemas de medição.

Para as aberturas de 10, 60, 70 e 80%, tanto para o coeficiente $N_{0,1\%}$ e $N_{1,0\%}$, os dados apresentaram-se mais dispersos em relação a curva de ajuste. A abertura de 10% apenas duas vazões foram verificadas devido a disponibilidade dos dados, podendo influenciar na análise dos dados e para as aberturas superiores a 60% a curva de ajuste torna-se menos acentuada e o conjunto de dados também torna-se mais estável, porém com alguns picos, que pode ter sido ocasionado por erros de medição dos dados.

Os coeficientes estatísticos de distribuição de probabilidade (N) associado as probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9% para os dados obtidos no modelo físico hidráulico implantado na UFRGS não foram verificados, pois os dados obtidos no presente estudo não apresentaram o mesmo comportamento das pressões mínimas, necessitando de uma investigação mais aprofundada no comportamento das pressões máximas.

5. Conclusões

A partir da caracterização das distribuições de pressões médias verificadas experimentalmente junto à base do conduto retangular a jusante de comporta foi possível identificar que as menores cargas de pressões médias ocorrem logo a jusante da comporta, até uma distância, entre 0,10 a 0,20m, a qual varia conforme a abertura da comporta. A região do conduto que é influenciada pela comporta diminui à medida que aumenta o grau de abertura da comporta, devido a região de recirculação do escoamento também diminuir. Conforme a abertura da comporta aumenta para uma mesma vazão, as pressões aumentam, indicando que para maiores aberturas tem-se pressões maiores. As menores pressões registradas experimentalmente na presente pesquisa foram na ordem de -700mm.c.a e -500mm.c.a para a vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$, abertura de 40% e $23,0\text{L.s}^{-1}$, abertura de 30%, respectivamente, sendo o grau de abertura de 40% a situação mais crítica.

As flutuações de pressões ao longo do conduto assumem valores baixos logo a jusante da comporta, aumentando até atingir a máxima carga de flutuação de pressão a uma distância em torno de 0,20m a 0,40m da borda da comporta, onde começa a decrescer até valores próximos ao primeiro ponto próximo da comporta. A maior carga de pressão flutuante registrada foi de 203mm.c.a. para a abertura de 40% e vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$ e 193mm.c.a. para a abertura de 30% e vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$. As máximas cargas de flutuação de pressão ocorrem em distâncias a partir da borda da comporta diferentes de onde ocorrem as mínimas cargas de pressões médias.

O conhecimento da distribuição das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representando as pressões mínimas, e, 99,0% e 99,9%, representando as pressões máximas, possibilita que se tenha uma estimativa da tendência do valor mínimo e máximo que as pressões podem atingir. O comportamento a jusante da comporta das pressões máximas e mínimas é semelhante ao comportamento das pressões médias.

As pressões mínimas associadas a probabilidade de 0,1% e 1,0% de não-excedência tem seu valor mínimo a uma distância em torno de 0,25m a jusante da borda da comporta e a região que a mesma interfere no escoamento é em torno de 0,60 a 0,80m. Nas aberturas de 30% e 40% foram registradas as menores pressões, com 0,1% de probabilidade de não-excedência, com valores de -965mm.c.a. gerada por uma vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$, e, -1164mm.c.a. gerada por uma vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$,

respectivamente. Também foram registradas as menores cargas de pressões para as pressões mínimas associadas a probabilidade de 1,0% de não-excedência, para as aberturas de 30% e 40%, onde para a abertura de 30% foi registrado uma carga de pressão de -864mm.c.a. gerada por uma vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e na abertura de 40% foi registrada uma carga de pressão de -1063mm.c.a. gerada por uma vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$, sendo estas as situações mais críticas de funcionamento do sistema para as vazões ensaiadas.

As pressões máximas associadas a probabilidade de 99,9% e 99,0% de não-excedência apresentam as menores pressões, até uma distância, de aproximadamente 0,15m, a jusante da borda da comporta e a uma distância longitudinal em torno de 0,40m que a comporta exerce influência no escoamento. Para as pressões associadas a probabilidade de 99,9% as aberturas com menores carga de pressão foram 30 e 40%, apresentando pressões de -326mm.c.a. para a vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$ e -297mm.c.a. para a vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$ respectivamente. Para as pressões associadas a probabilidade de 99,0% a menor carga de pressão, no valor de -341mm.c.a., para a vazão de $23,0\text{L.s}^{-1}$, já para a abertura de 40% a menor pressão encontrada foi no terceiro ponto medido, para a vazão de $31,8\text{L.s}^{-1}$, no valor de -416mm.c.a..

O comportamento da pressão média, flutuação de pressão e pressões extremas para as aberturas de 80% e 90% torna-se constantes, independente da vazão ensaiada, indicando que a comporta deixa de influenciar significativamente escoamento.

As pressões com distintas probabilidades de ocorrência podem ser caracterizadas pela pressão média e pela flutuação de pressão ponderada por um coeficiente característico representativo da probabilidade de ocorrência, de forma análoga ao verificado em ressaltos hidráulicos, conforme proposto por Marques et al., (1997). Com isso, a partir de parâmetros adimensionais, caracterizou-se o comportamento da distribuição de pressões médias e flutuação de pressão a jusante da comporta.

Para os escoamentos com número de Reynolds superior a 140.000, foi possível descrever o comportamento das pressões médias ao longo da base do conduto retangular a jusante de comporta pela relação entre um coeficiente adimensional de posição e um coeficiente adimensional de pressão média. Os coeficientes de pressão

média na base do conduto diminuem conforme aumenta a distância até certo ponto, onde os valores dos coeficiente passam a aumentar.

Também foi possível descrever o comportamento das flutuações de pressão ao longo da base do conduto a jusante de comporta pela relação entre um coeficiente adimensional de posição e um coeficiente adimensional de flutuação de pressão, para todos os números de Reynolds. Os coeficientes de flutuação de pressão na base do conduto a jusante da comporta aumentam conforme aumenta a distância até certo ponto, atingindo valores máximos, e a partir deste ponto os valores começam a decrescer.

Os coeficientes estatísticos associados às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% seguem uma distribuição normal de probabilidades até a posição adimensional 4,0, podendo indicar nesta região os efeitos de compressão são mais intensos, devido a expansão do jato e a região de recirculação do escoamento. À medida que o jato tende a se expandir o movimento ascensional do escoamento passa a reduzir os efeitos de compressão, tendo como reflexo a mudança no comportamento do coeficiente N . Já os coeficientes estatísticos associados às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% não seguem uma distribuição normal de probabilidades na região próxima a comporta, devendo ser melhor estudado os percentis 99,0% e 99,9%, que talvez não corresponda a probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9%.

Através da utilização dos adimensionais de pressão média e flutuação de pressão, juntamente com os coeficientes estatísticos com determinada probabilidade de não-excedência propostos nesta pesquisa é possível estimar as pressões atuantes na base de um conduto retangular a jusante de comporta, com determinada probabilidade de não-excedência, ainda na etapa de projeto, aumentando a eficiência do projeto destes sistemas.

Os ajustes para os adimensionais de pressão média e os ajustes dos coeficientes estatísticos de probabilidade de ocorrência 0,1% e 1,0% ajustaram-se bem para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS. Para os adimensionais de flutuação de pressão os expoentes propostos não ajustaram-se para os dados provenientes do modelo da UFRGS, sendo que um dos motivos pode ser devido a diferença de escala dos modelos.

6. Recomendações

A partir dos resultados encontrados nesta pesquisa, pode-se indicar alguns aspectos e recomendações que devem ser avaliadas para a continuidade desta pesquisa:

- Avaliar outros expoentes para o adimensional de flutuação de pressão, que seja igual para ambos modelos.
- Investigação mais aprofundada no comportamento das pressões máximas associadas as probabilidades de não-excedência de 99% e 99,9%, não utilizando mais os percentis 99% e 99,9% como parâmetro representativo.

Referências

ABREU, S. A. **Processo de cavitação em estruturas hidráulicas: Escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertido**. 2014. 76p. TCC (Graduação em Engenharia Hídrica) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

AMARAL, L. G. H. do; RIGHES, A. A. Estruturas automáticas para controle de água no canais em lavoura de arroz irrigado. Eng. Agríc., Joboticabal, v. 25, n.1, p.272-281, jan./abr. 2005.

ARAUZ, I. J. de. **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas**. 2005. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7259. **Comportas hidráulicas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2001. 16p. Disponível em: <<http://abntcolecao.com.br/ufpel/norma.aspx?ID=2464#>> Acesso em: 05 out. 2014.

BATTISTON, C. C.; FINGER, G. R.; MEES, A. A. A.; CANELLAS, A. V. B.; DAI PRÁ, M.; MARQUES, M. G.; ENDRES, L. A. M. (2009). **Análise do escoamento a jusante de válvulas de eclusas para o caso de pequenas aberturas**. In Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica e I Seminário de Eficiência Energética no Setor Elétrico, Belém, Jun. 2009.

BATTISTON, C. C. **Análise da Dinâmica do Escoamento a Jusante de Comporta de Controle de Vazão em Aqueduto de Eclusa de Navegação**. 2013. 223f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BIANCO CARPENTERIA MECCANICA – PARATOIE. Disponível em: <<http://www.biancosrl.net/it/prodotti/paratoie.html>> Acesso em: 27 mar 2016.

BELAUD, G.; CASSAN, L.; BAUME, J.-P. Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement. **J. Hydraul. Eng.** v. 135 (12), p. 1086-1091, 2009.

BRASIL. MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário**. Brasília, 2010.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulic**. New York: McGraw-Hill Book Company, INC. 1959. 680 p.

CLEMMENS, A. J.; STRELKOFF, T. S.; REPLOGLE, J. A. Calibration of Submerged Radial Gates. **J. Hydraul. Eng.** v. 129, p. 680-687, 2003.

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. 2011. 208f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DALLA CORTE, M.; OLIVESKI, R. de C.; MARQUES, M. G.; Análise numérica do escoamento a jusante de uma comporta segmento invertida. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, São Leopoldo, v. 8, n. 2, p. 49-59, 2012.

DALLA CORTE, M. **Simulação numérica tridimensional do escoamento em uma comporta segmento invertida por CFD**. 2013. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

DUTRA, T. de O. **Critérios de projeto hidráulico de eclusas de navegação: pressões médias nos condutos de enchimento e esvaziamento**. 2014. 94f. TCC (Graduação em Engenharia Hídrica) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

ERBISTE, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. Editora Campus/Eletróbrás, Rio de Janeiro: 1987.

ELETRÓBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: 2003. 279 p.

FCA FLOW CONTROL APPLICATIONS – RADIAL GATE. Disponível em: <<http://www.fcavalves.com/radial-gate-2>> Acesso em 27 mar 2016.

HACKER - PRODUTOS HIDROMECAÑICOS COMPORTAS. Disponível em: <http://www.hacker.ind.br/produtos_hidromecanicos_comportas.php> Acesso em: 27 mar 2016.

HAINDL, K., SOTORNÍK, V. Quantity of air drawn into a conduit by the hydraulic jump and its measurement by gamma-radiation. **Proc., International Association of Hydraulic Research**. Lisbon, v.2, 1957a.

HAINDL, K., Hydraulic Jump in Closed Conduit. **Proc., International Association of Hydraulic Research**. Lisbon, v.2, 1957b.

HENRY, H. R. Discussion of "Difusion of Submerged Jets". In: **Difusion of Submerged Jets**. New York: ASCE, vol.115, 1950, 687-694 p.

KNAPP, F. H. Ausfluss, Überfall und Durchfluss im Wasserbau. Verlag G. Braun: Karlsruhe, 1960.

KEMPKA, M. **Estimativa da distribuição longitudinal das pressões a jusante de comportas tipo segmento invertida**. 2014. 91f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LIN, C.H.; YEN, J. F.; TSAI, C. T. Influence of Sluice Gate Contraction Coefficient on Distinguishing Condition. **J. Irrig. Drain Eng.** v. 128 (4), p. 249-252, 2002.

LOPARDO, R. A. Notas sobre Fluctuaciones Macroturbulentas de Presion, Medicion, Analisis y Aplicacion al Resalto Hidraulico. In **Curso n 1 – Turbulencia, Cavitation y Aireacion de Fenomenos Hidraulicos**. São Paulo, 1986.

LOPARDO, R. A., FATTOR, C. A., LOPARDO, M. C., CASADO, J. M. **Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basins**. Hydraulics of Dams and River Structures, editado por Farhad Yazdandoost & Jalal Attari, A. A. Balkema Publishers, London U.K. Part I, p. 133 – 138, 2004.

LOPES, C. C.; CEREZER, S. M.; MARQUES, M. G. **Análise do comportamento apresentado pelas pressões longitudinais registradas a jusante de válvulas de eclusas**. In Anais do Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística. São Pedro, SP, 2010.

MEDRONHA, G. de A.; ABREU, A. S.; OLIVEIRA, F.; PALAURO, C.; MARQUES, M. G.; KEMPKA, M.; DAI PRÁ, M. (2013). **Escoamentos a jusante de comportas tipo tainter invertida em condutos – Proposta de analogia com o ressalto hidráulico afogado**. In Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Nov. 2013.

MOHAMMED, A. Y.; KHALEEL, M. S. Gate Lip Hydraulics under Sluice Gate. **Modern Instrumentation**, v. 2, p. 16-19, 2013.

NEGM, A.-Z. M. **Analysis and Formulation of Hydraulic Jumps in Sloping Rectangular Closed Conduits**. In Anais do Seventh International Water Technology Conference. Cairo, Egypt, 2003.

NEVES, E. T. **Curso de Hidráulico**. Rio de Janeiro: Editora Globo, 1960. 577 p.

PALAURO, C. **Análise das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação**. 2012. 96f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PALAURO, C.; KEMPKA, M.; MARQUES, M; G.; DAI PRÁ, M. Distribuição das Pressões a Jusante de Comportas tipo Segmento Invertida em Modelo Físico de Eclusa de Navegação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n.1 p. 65-73, 2014

PALU, M. C.; SALLES, R. P. G.; SOUZA, D. D. B. de. **Processo de cavitação e projeto dos aeradores no descarregador de fundo do AH Cambambe**. In Anais do XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Punta Del Este, Uruguay, 2010.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engeneering Monograph 25, Denver. 1974.

PORTO, R. de M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC – USP, 2006. 540 p.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jump in horizontal conduits. **Water Power**. fev. 1965.

RAJARATNAM, N. **Hydraulic jumps**. In: CHOW, V.T. (ed) Advances in Hydrosience. v. 4, 1967.

RAJARATNAM, N. & SUBRAMANYA, K. Flow equations for the sluice gate. **J. Irrig. Drain Eng.**, v. 93, n. 3. 1967.

SANTOS, S. R. **Projeto Hidráulico de eclusas de alta queda**. 1998. 225f. Texto (Título de Professor Livre Docente) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SANTOS, J. B. V. dos; OLIVESKI, R. de C.; MARQUES, M. G.; DAI PRÁ, M.; DALLA CORTE, M.; OLIVEIRA, L. L. de M. Alteração geométrica do teto a jusante de comporta do Sistema de enchimento e esvaziamento para eclusa de navegação: Simulação numérica do escoamento e análise das pressões no teto do conduto. In Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luis, MA, 2012.

SANTOS, J. P. dos. **Escoamentos aerados em estruturas hidráulicas – Estudo experimental do escoamento a jusante de comportas em condutos retangulares**. 2015. 70p. TCC (Graduação em Engenharia Hídrica) Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 235 p.

SHARMA, H.R. Air-entrainment in high head gated conduits. **Journal of Hydraulic Division**. nov. 1976.

SILVA, J. P. H. da. **Esforços Hidrodinâmicos em Comportas Verticais (Downpull)**. 2011. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Smith, C.D., Chen, W. The hydraulic jump in a steeply sloping square conduit. **Journal of Hydraulic Research**. v. 27(3), 1989.

SWAMEE, P. K. Sluice-Gate Discharge Equations. **Journal of Irrigations and Drainage Engineering**, ASCE, vol. 118, n. 1, jan./feb. 1992.

TRIERWEILER NETO, E. F. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta com diferentes graus de submersão**. 2006. 174f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TRIERWEILER NETO, E. F.; MARQUES, M. G. Análise do Campo de Pressão em Ressalto Hidráulico Submerso a Jusante de uma Comporta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n.4 p. 55-68, 2008.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydraulic design criteria**. v. 2, 1977.

USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Hydraulic design lock culvert valves**. 1975.

Apêndices

Apêndice A - Comportamento das pressões médias por abertura

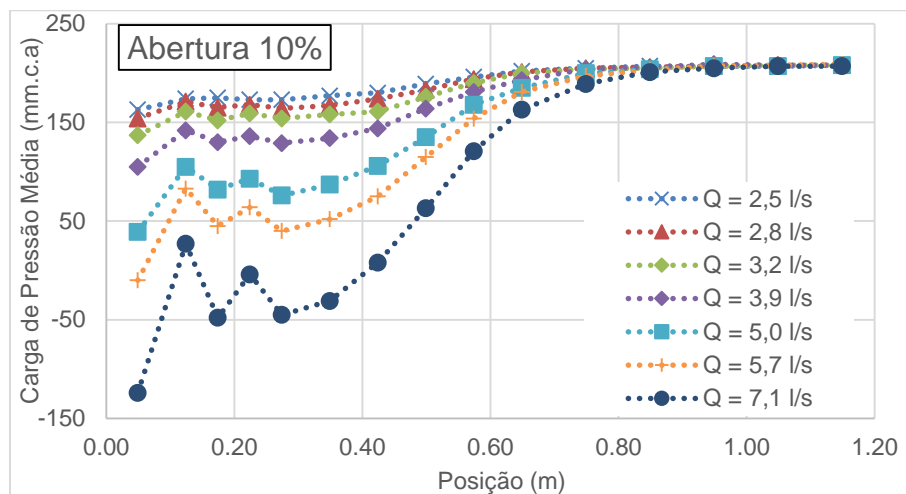


Figura 67 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 10%

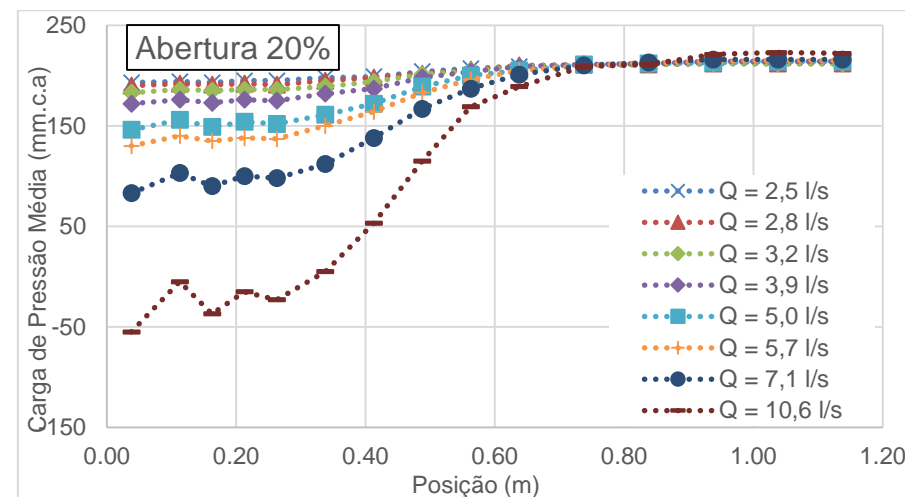


Figura 69 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 20%

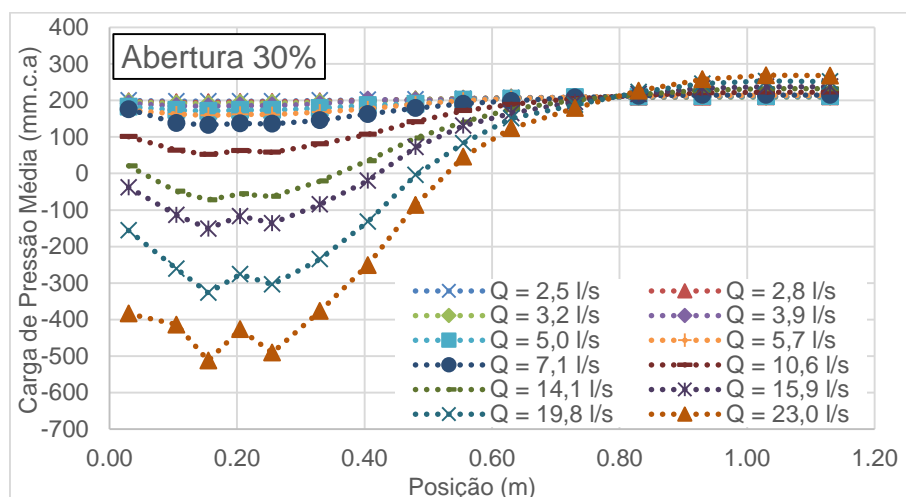


Figura 68 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 30%

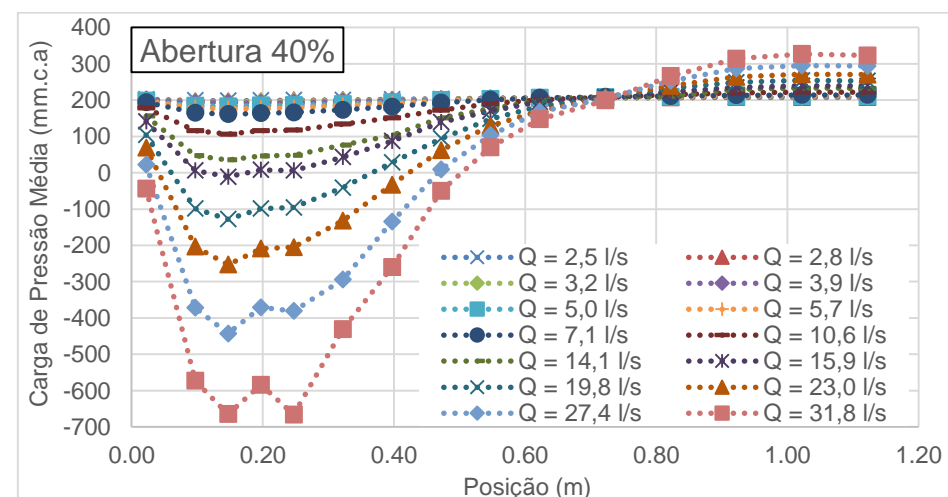


Figura 70 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 40%

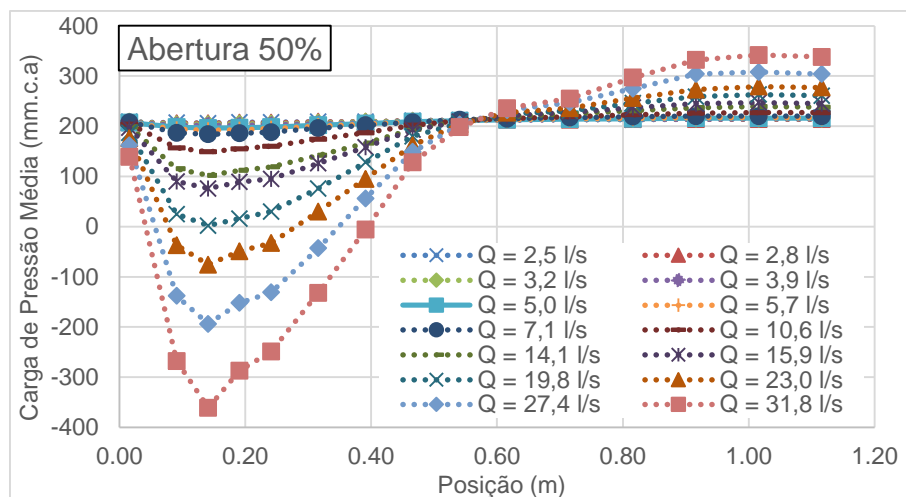


Figura 71 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 50%

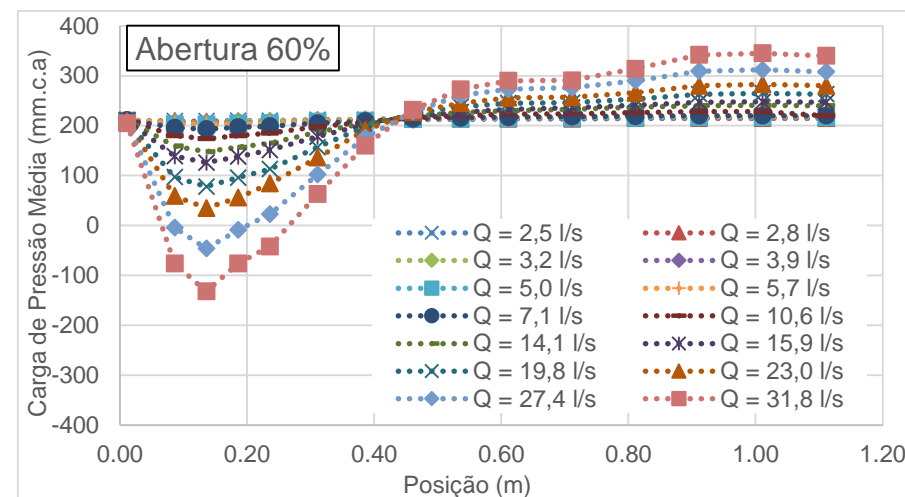


Figura 73 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 60%

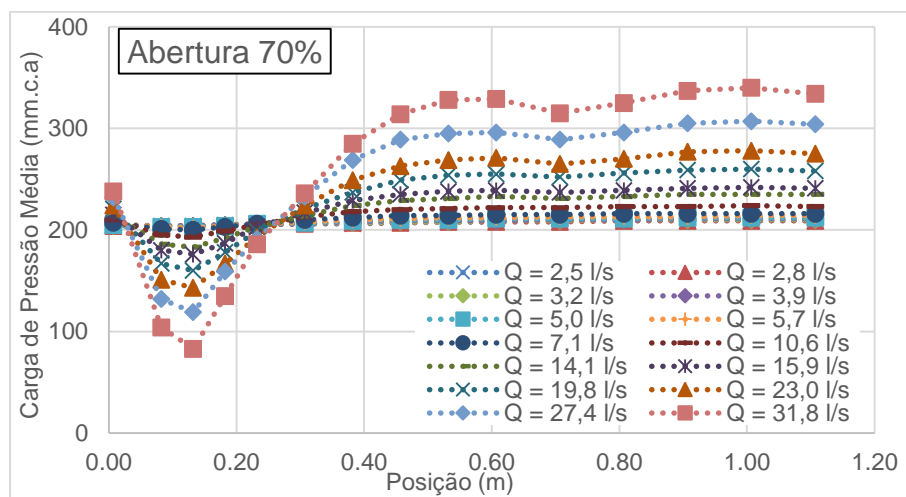


Figura 72 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 70%

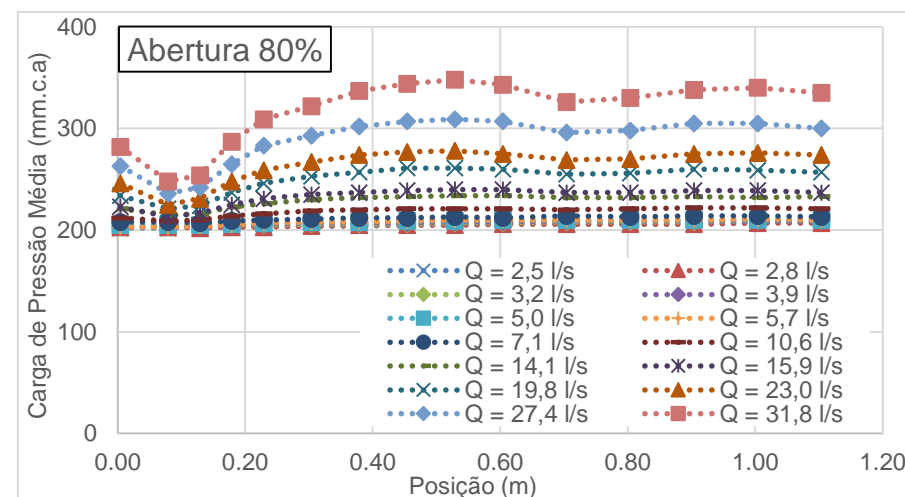


Figura 74 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 80%

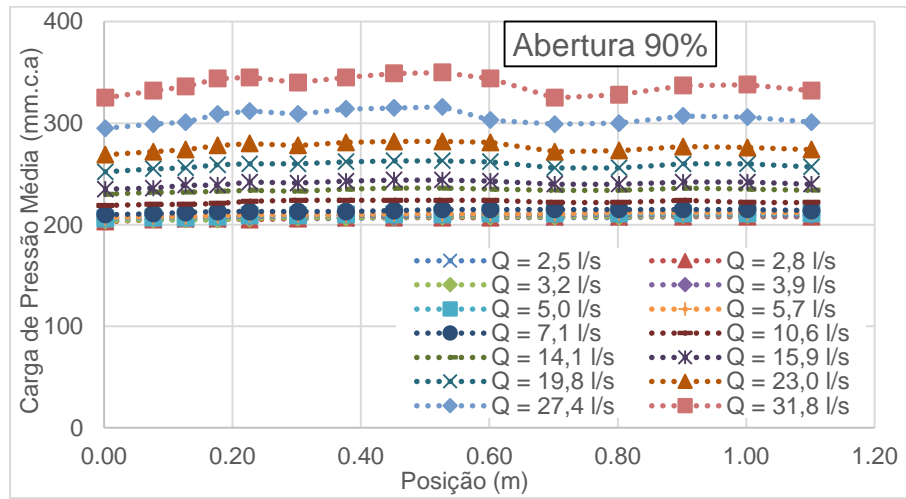


Figura 75 - Comportamento das pressões médias na base, abertura de 90%

Apêndice B - Comportamento das pressões médias na base por vazão

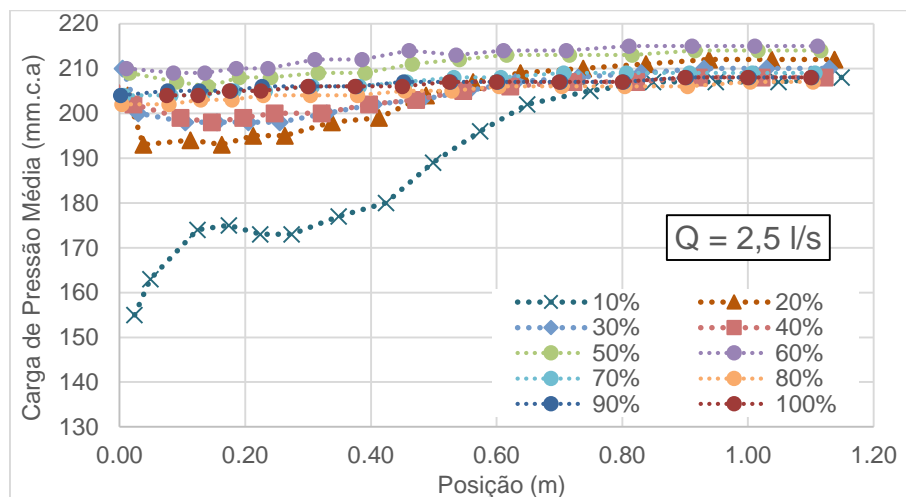


Figura 76- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 2,5 l/s

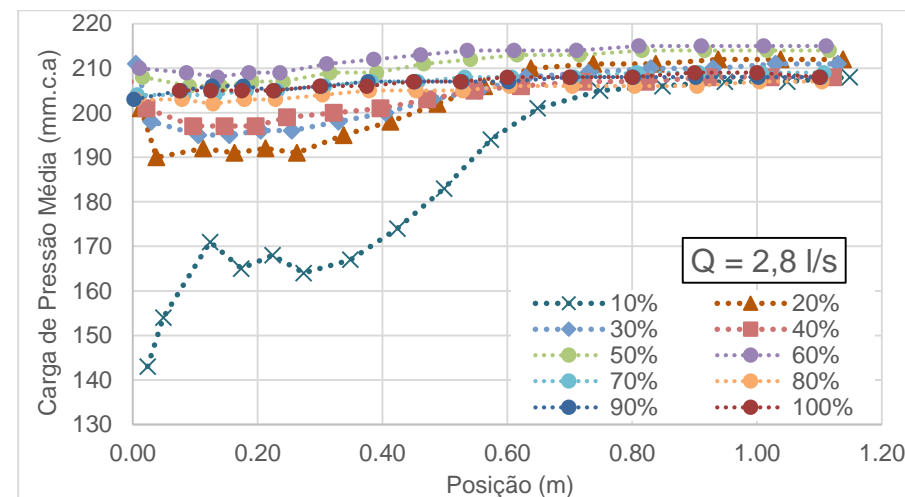


Figura 78- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 2,8 l/s

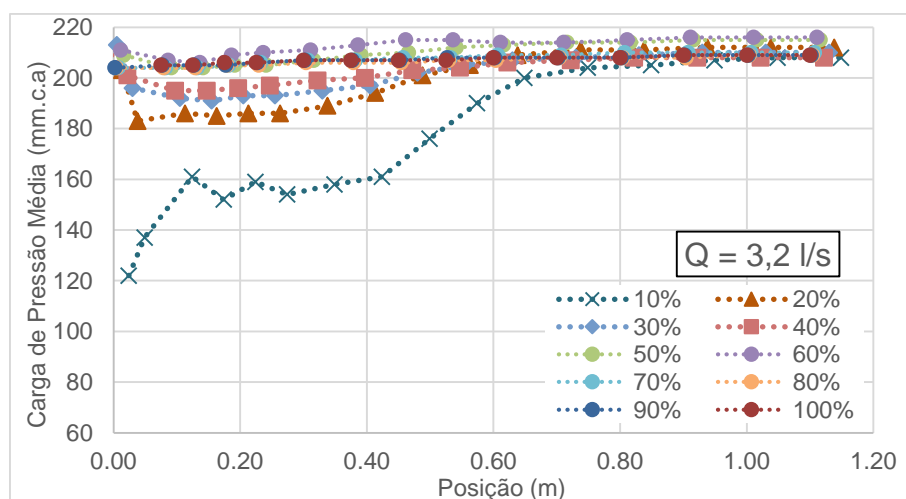


Figura 77- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 3,2 l/s

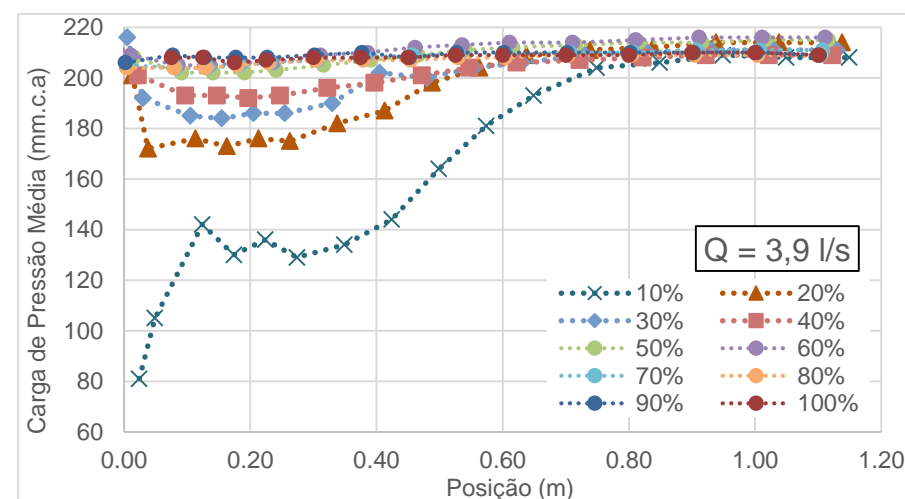


Figura 79- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 3,9 l/s

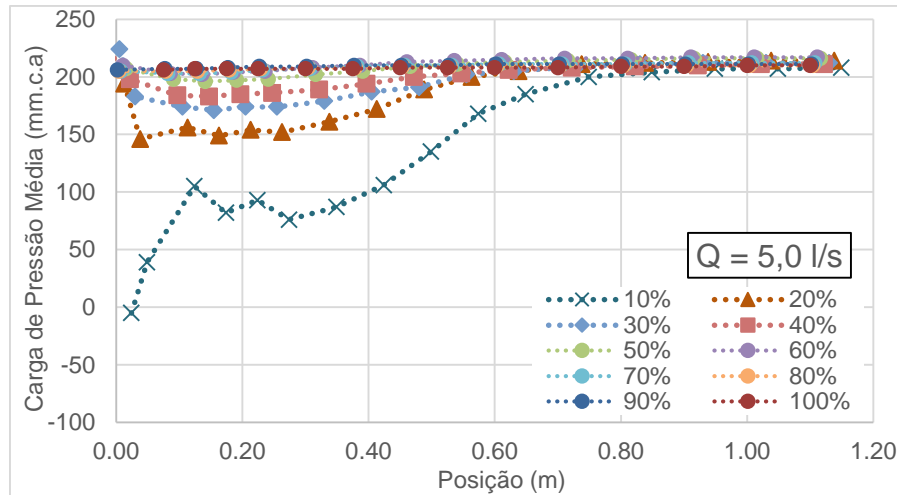


Figura 80- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 5,0 l/s

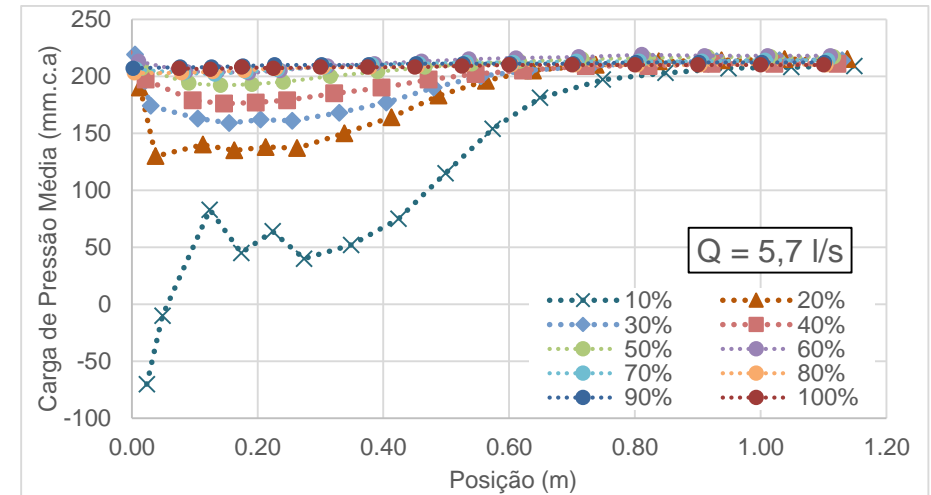


Figura 82- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 5,7 l/s

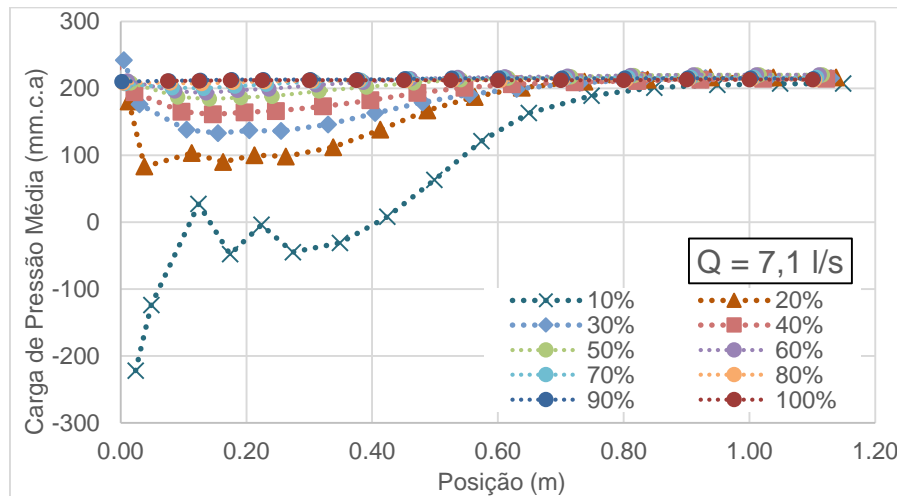


Figura 81- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 7,1 l/s

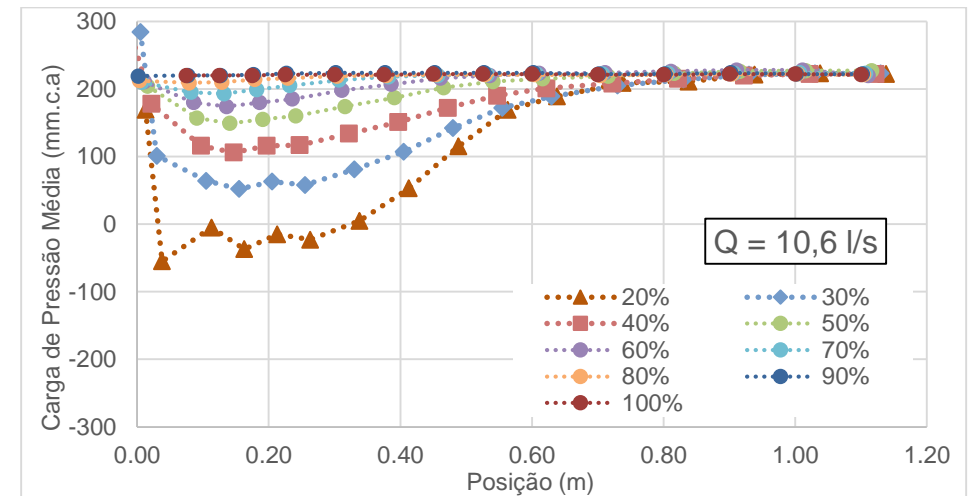


Figura 83- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 10,6 l/s

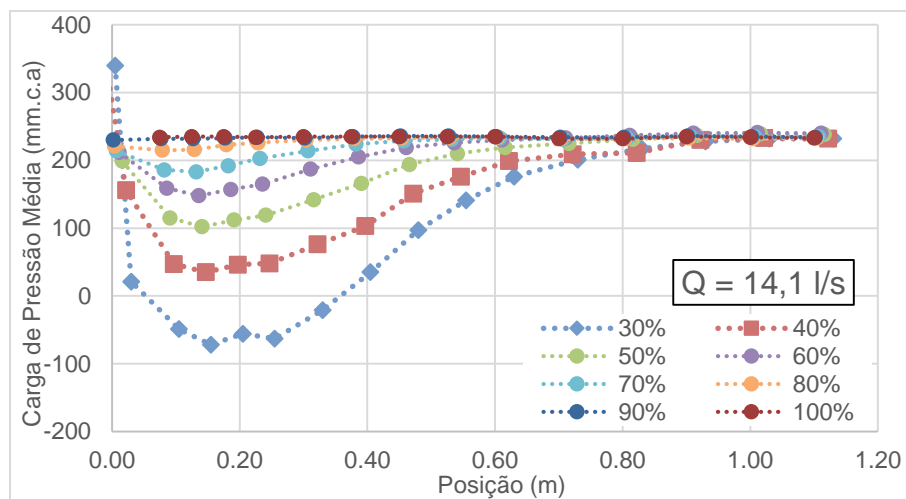


Figura 84- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 14,1 l/s

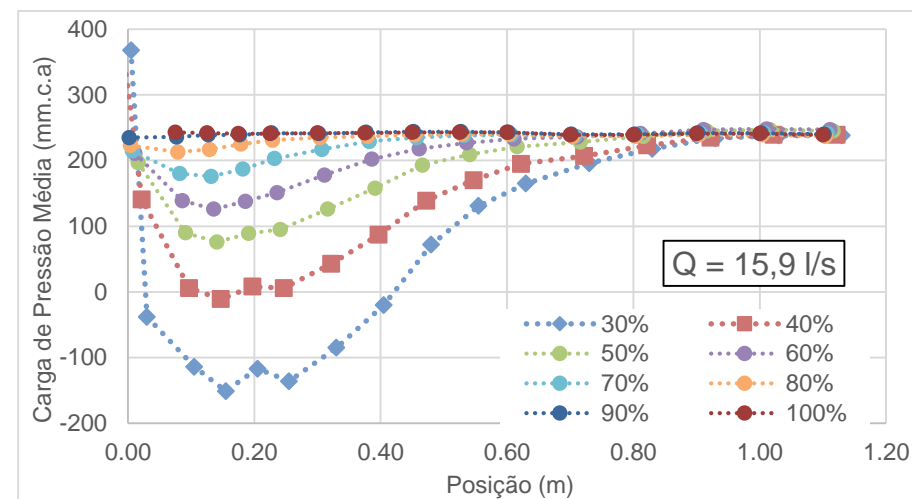


Figura 86- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 15,9 l/s

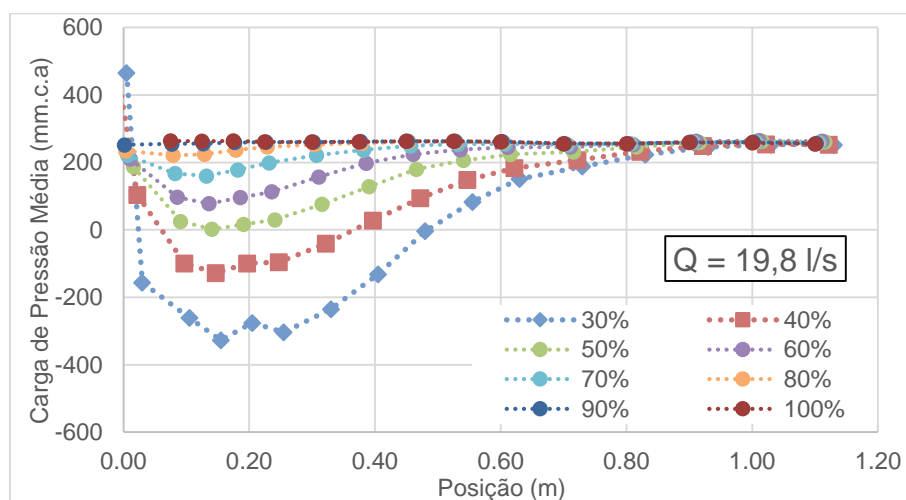


Figura 85- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 19,8 l/s

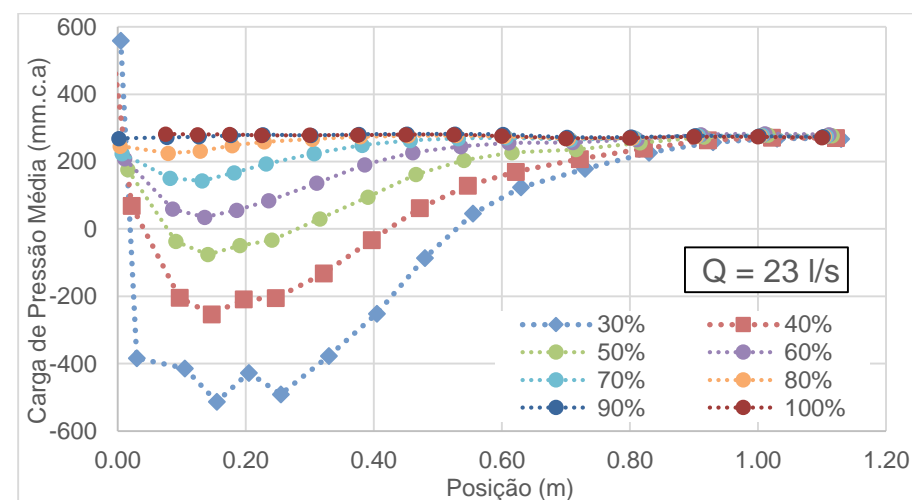


Figura 87- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 23 l/s

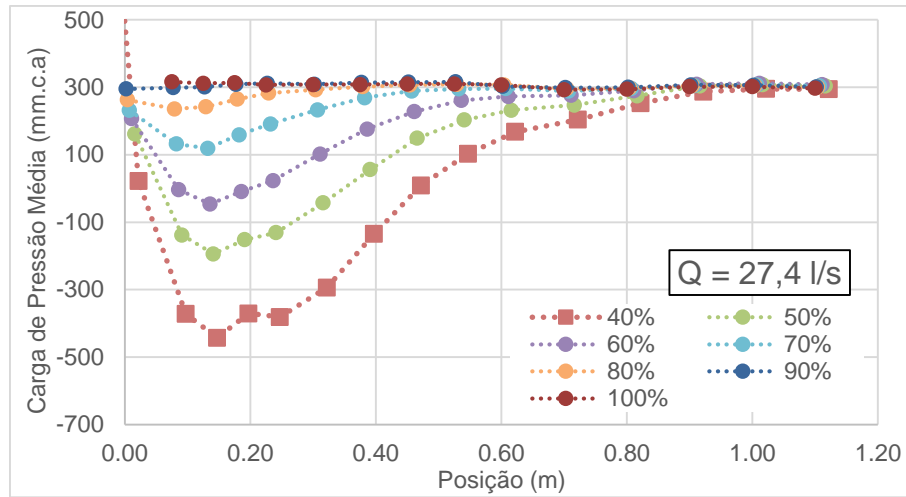


Figura 88- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 27,4 l/s

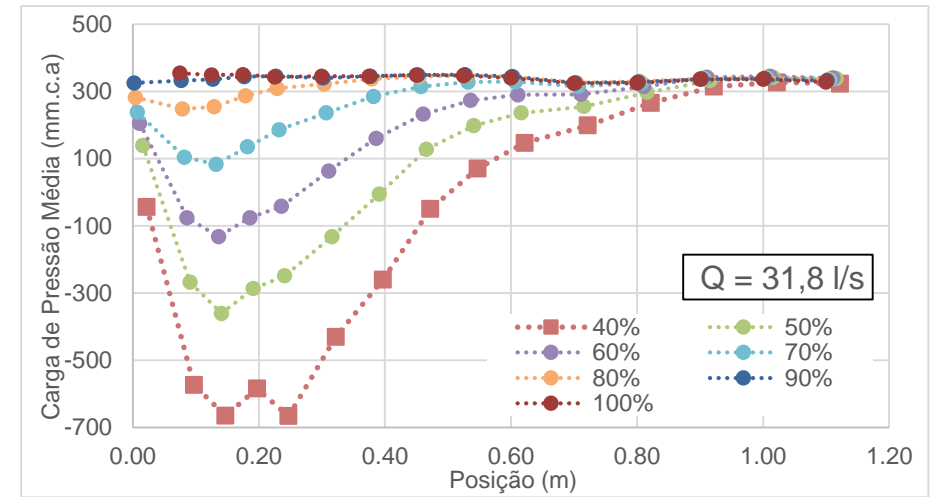


Figura 89- Comportamento das pressões médias na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice C - Comportamento das flutuações de pressões na base por abertura

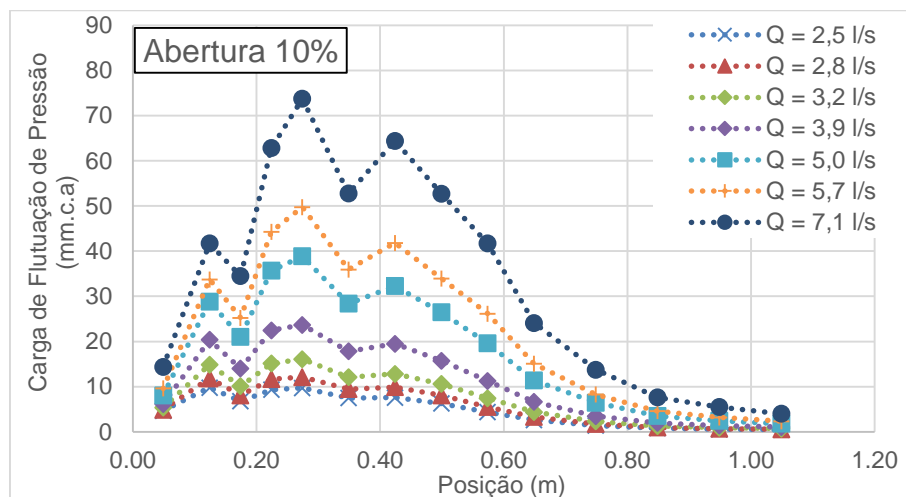


Figura 90– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 10%

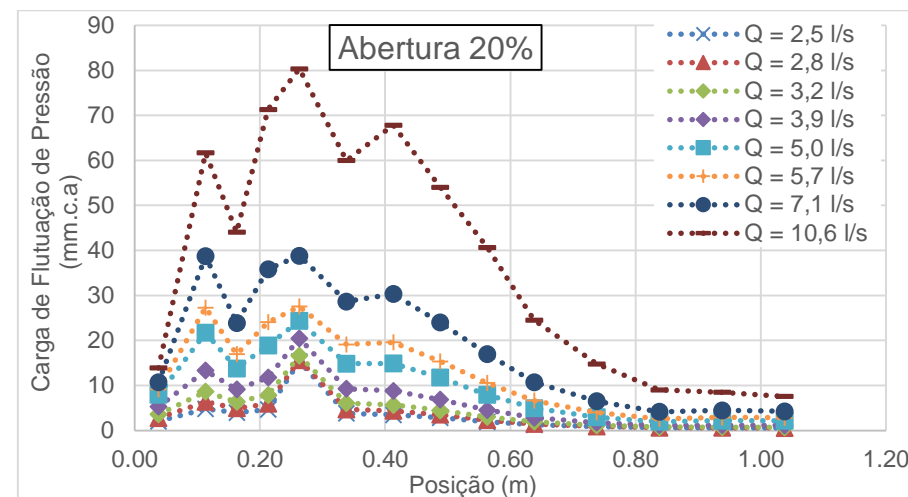


Figura 92– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 20%

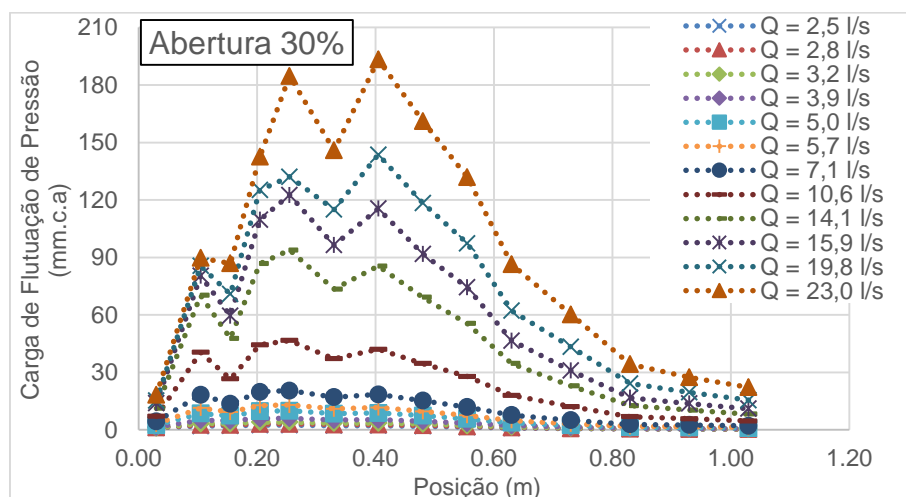


Figura 91– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 30%

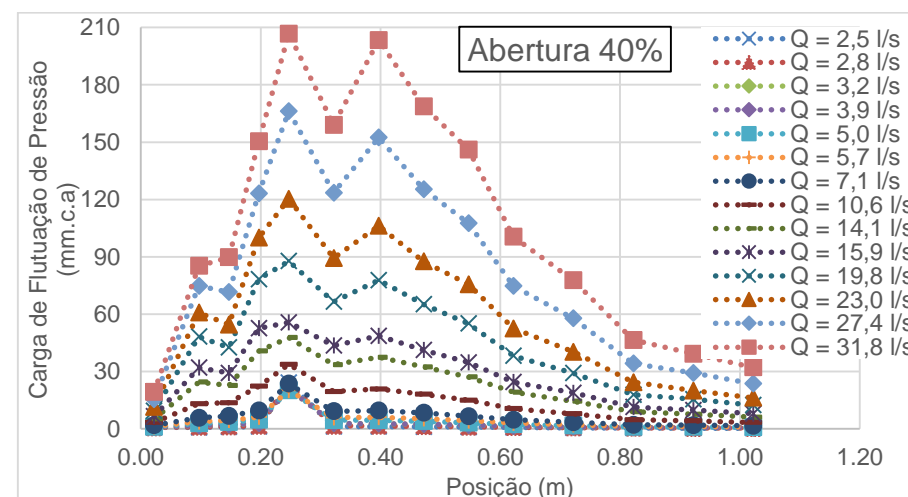


Figura 93– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 40%

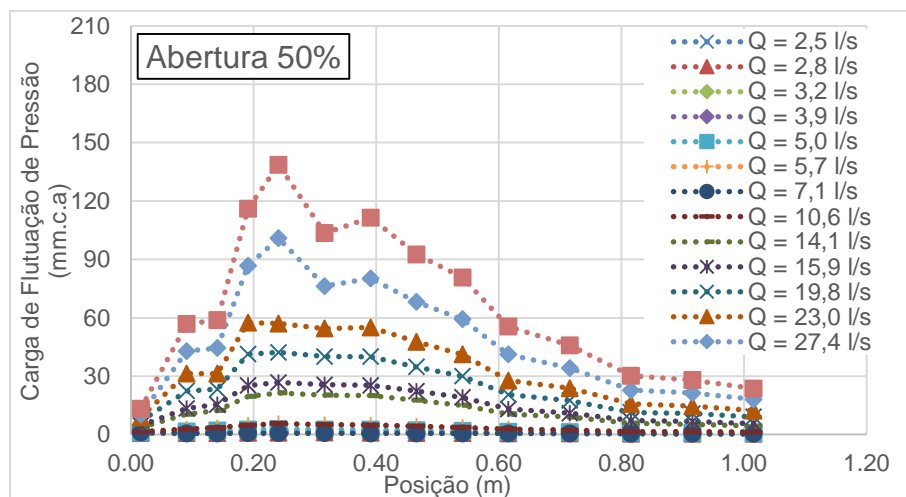


Figura 94– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 50%

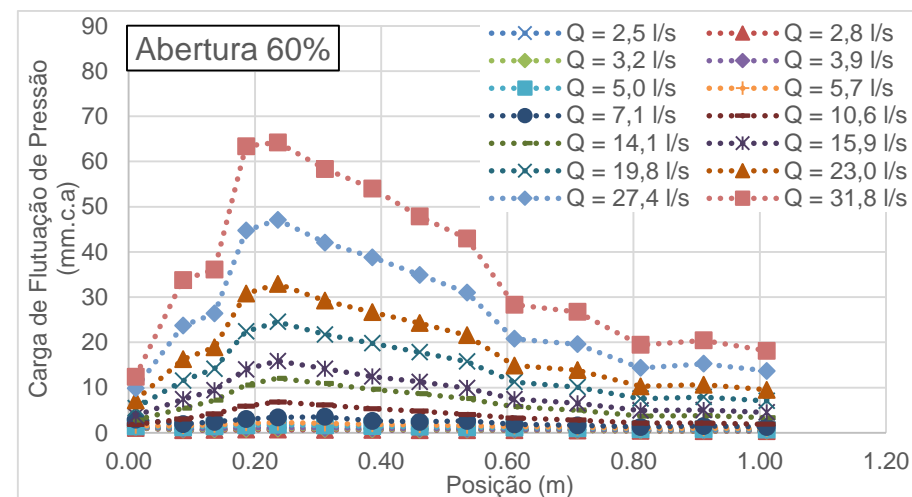


Figura 96– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 60%

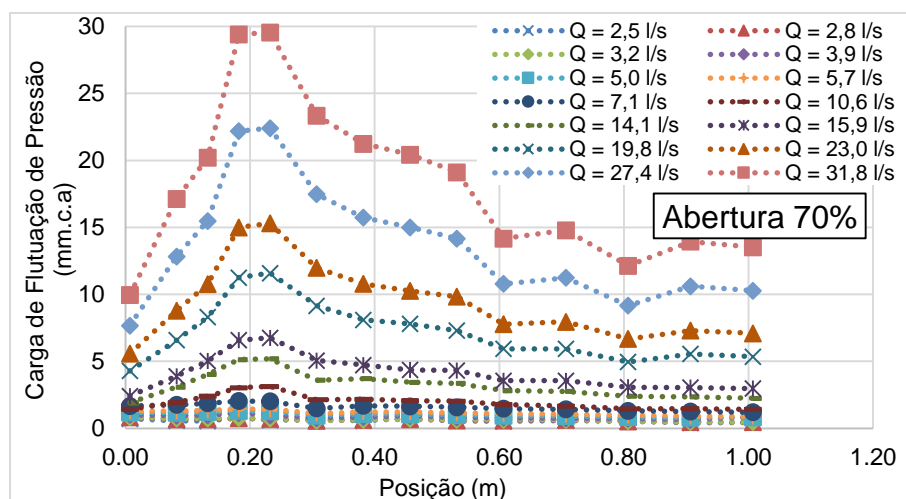


Figura 95– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 70%

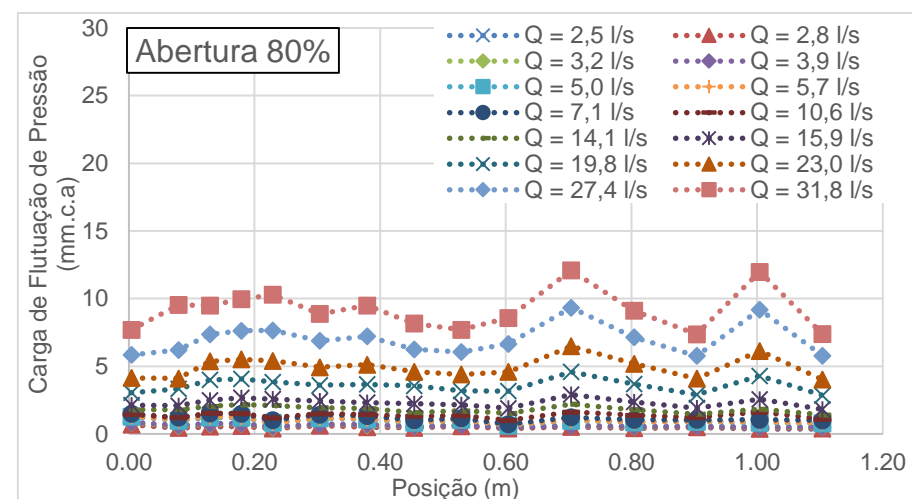


Figura 97– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 80%

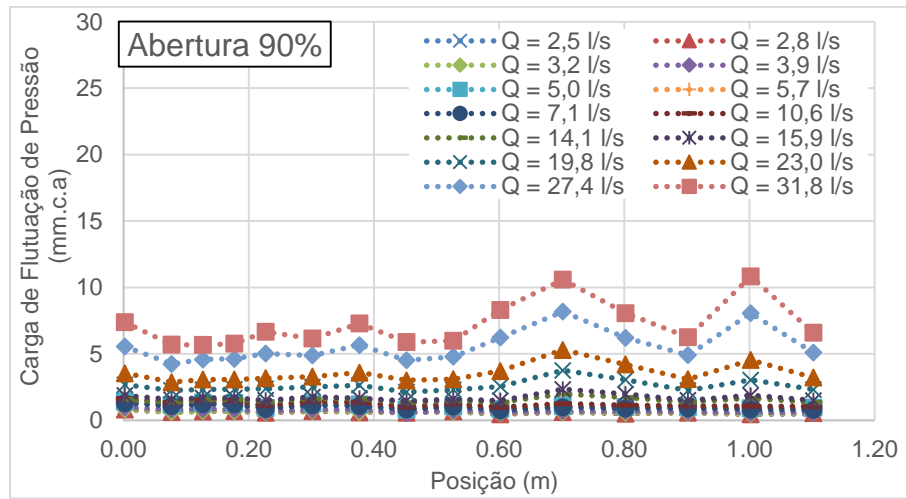


Figura 98– Comportamento das flutuações de pressão na base, abertura de 90%

Apêndice D - Comportamento das flutuações de pressão na base por vazão

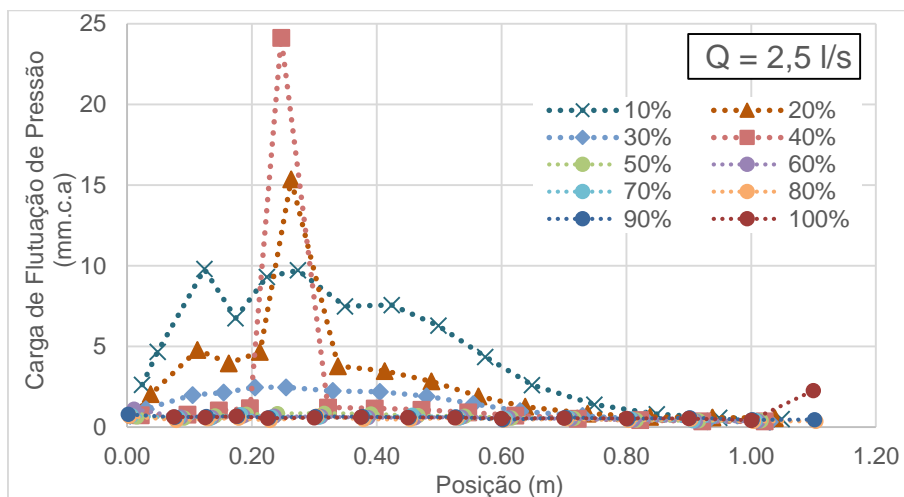


Figura 99 – Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 2,5 l/s

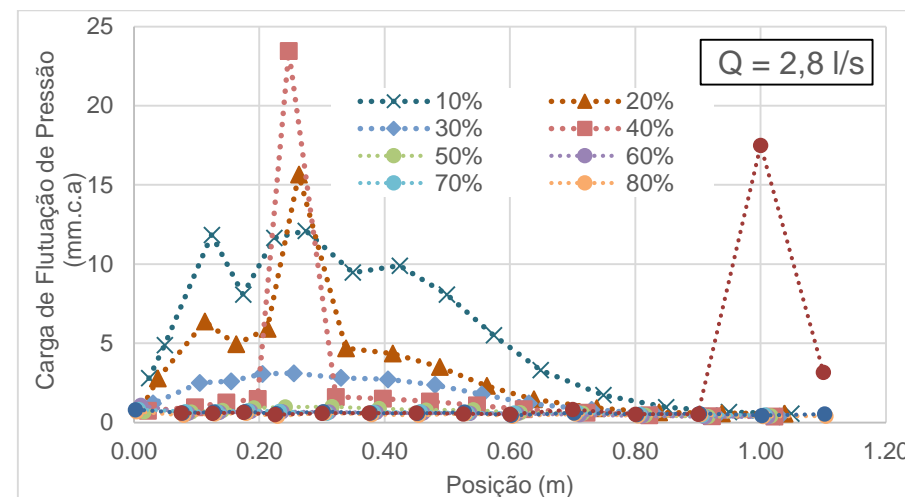


Figura 101 - Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 2,8 l/s

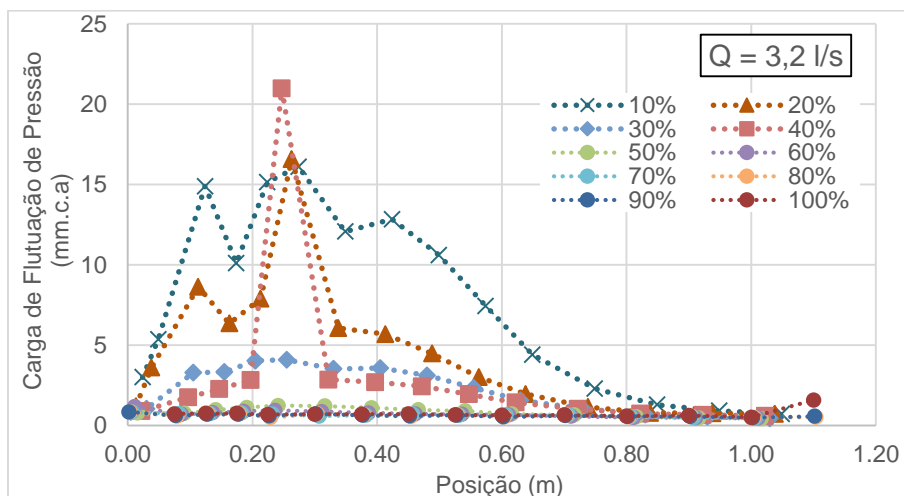


Figura 100 – Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 3,2 l/s

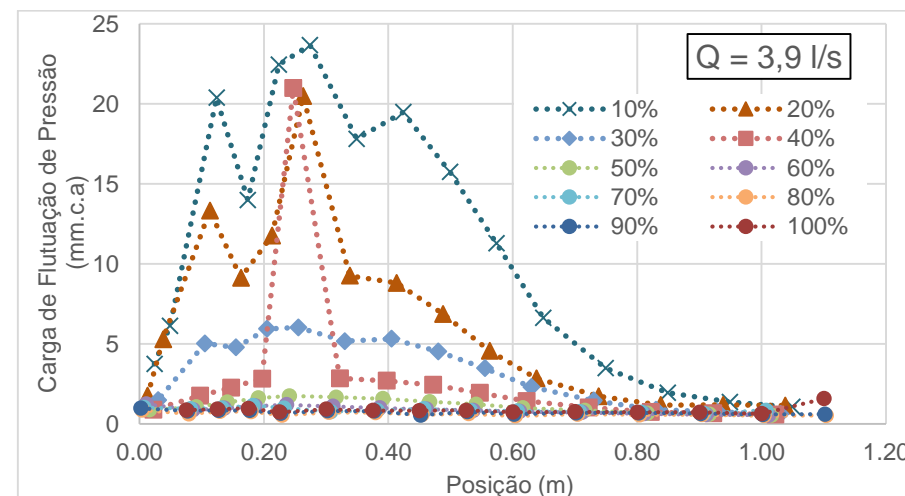
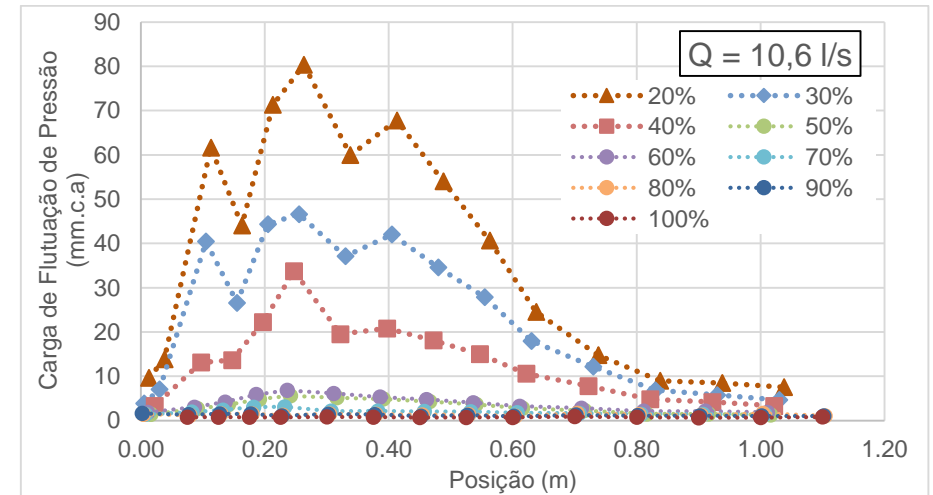
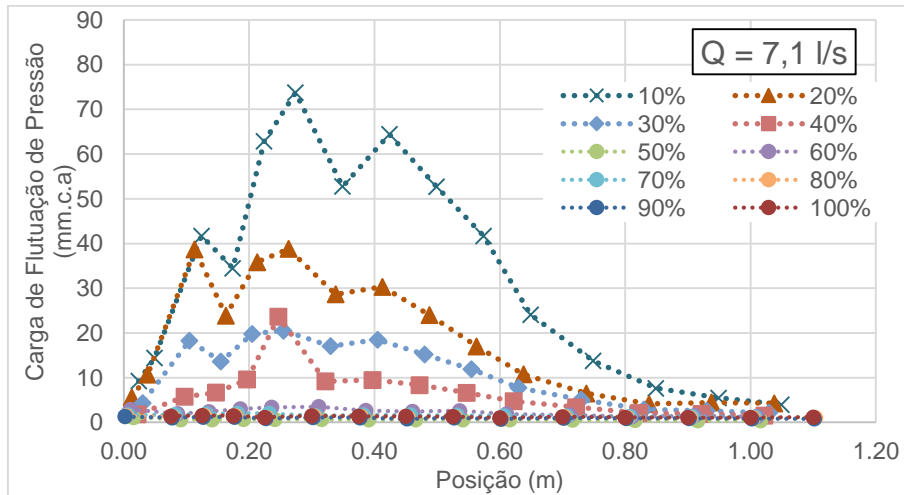
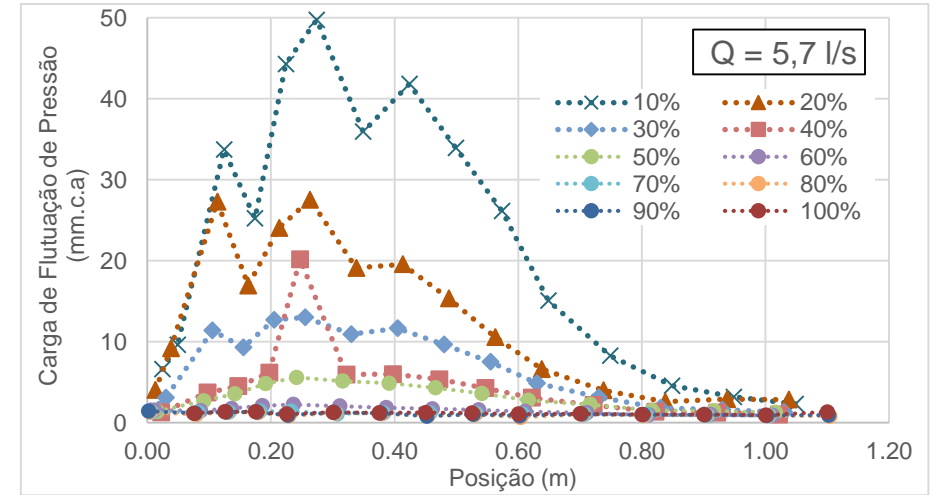
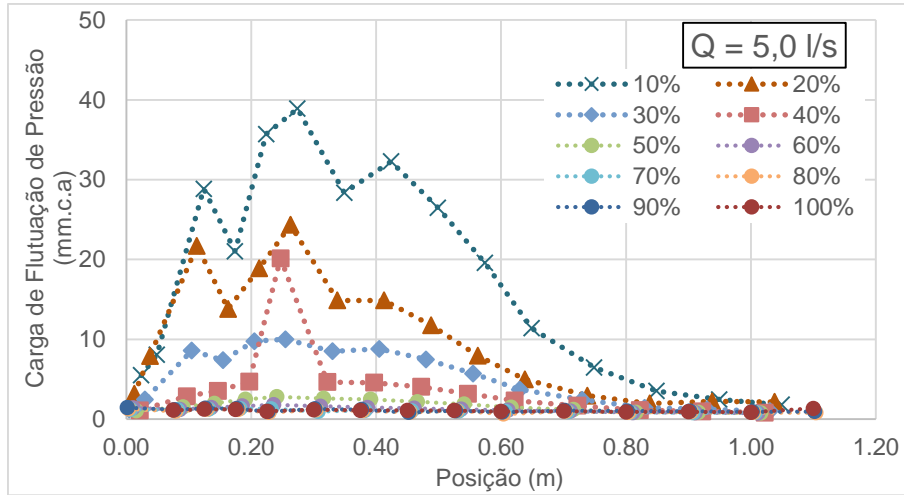


Figura 102- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 3,9 l/s



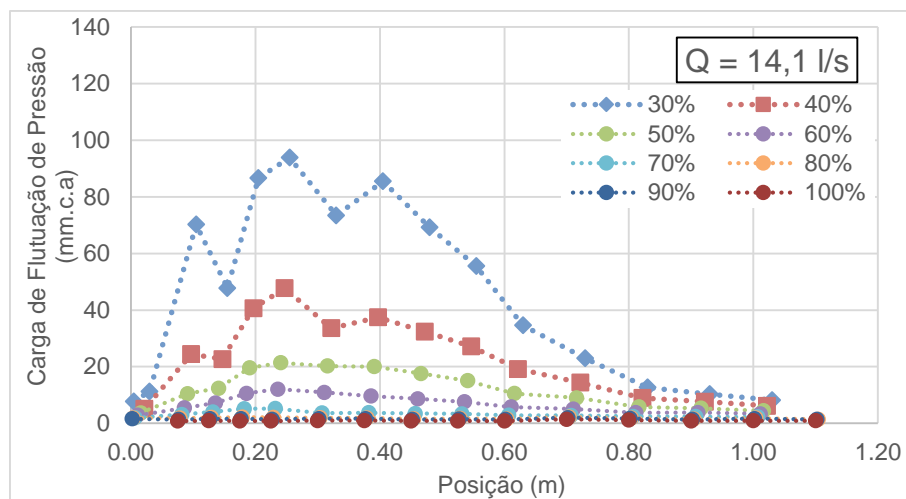


Figura 107- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 14,1 l/s

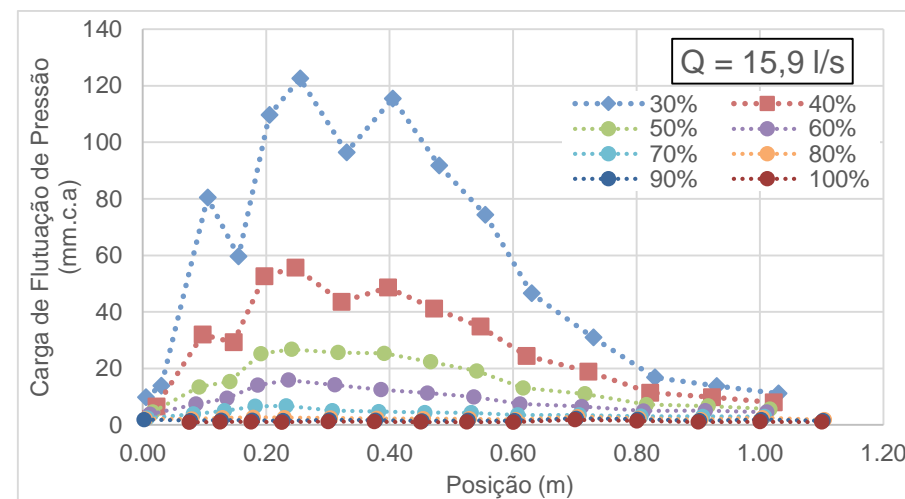


Figura 109- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 15,9 l/s

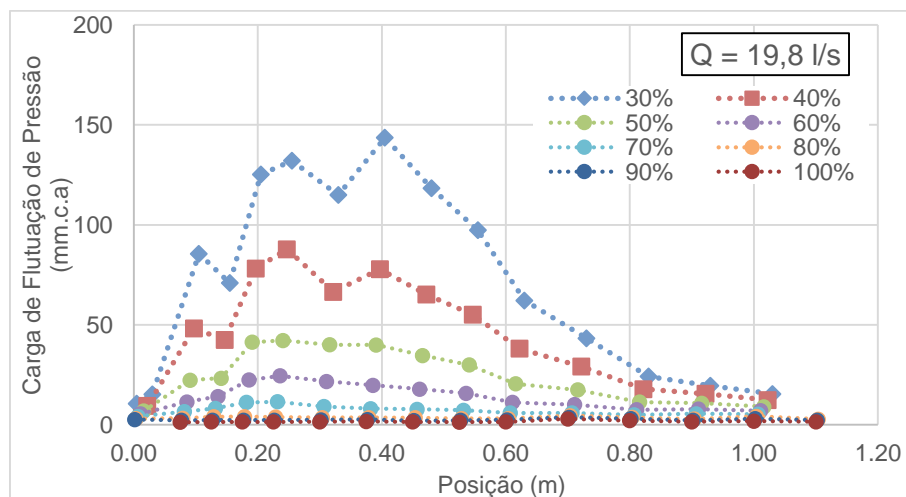


Figura 108- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 19,8 l/s

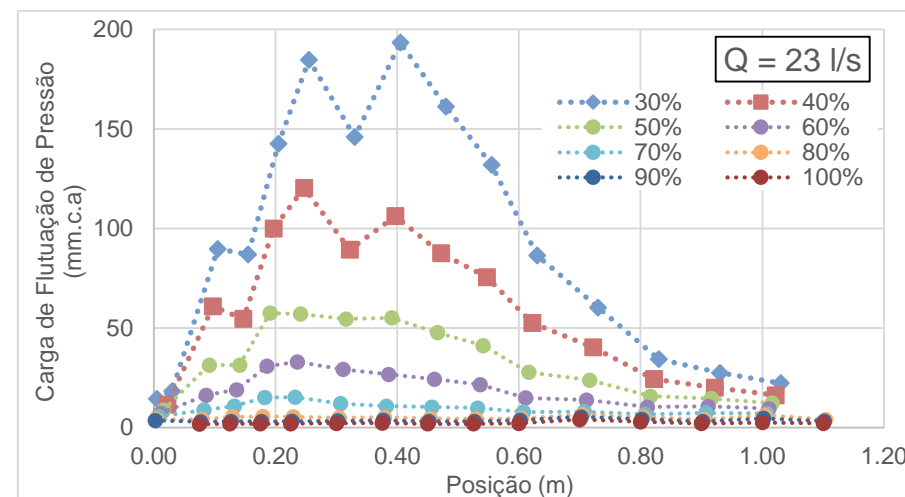


Figura 110- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 23 l/s

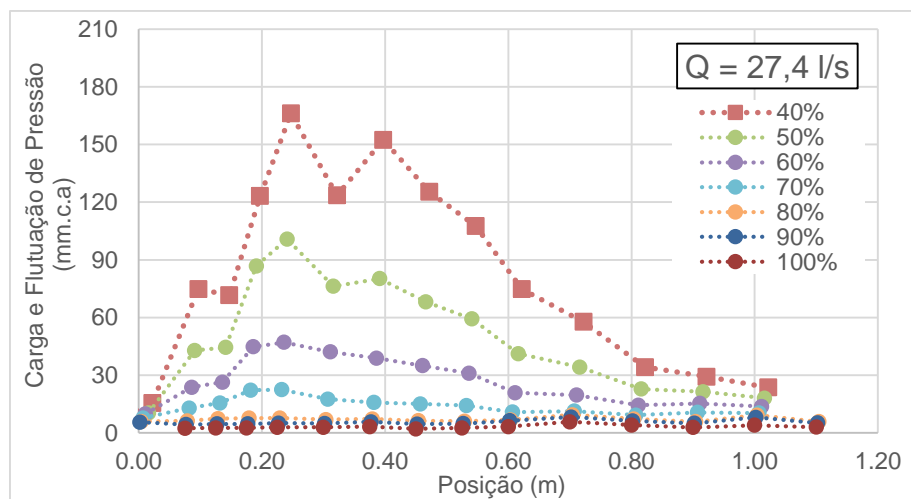


Figura 111- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 27,4 l/s

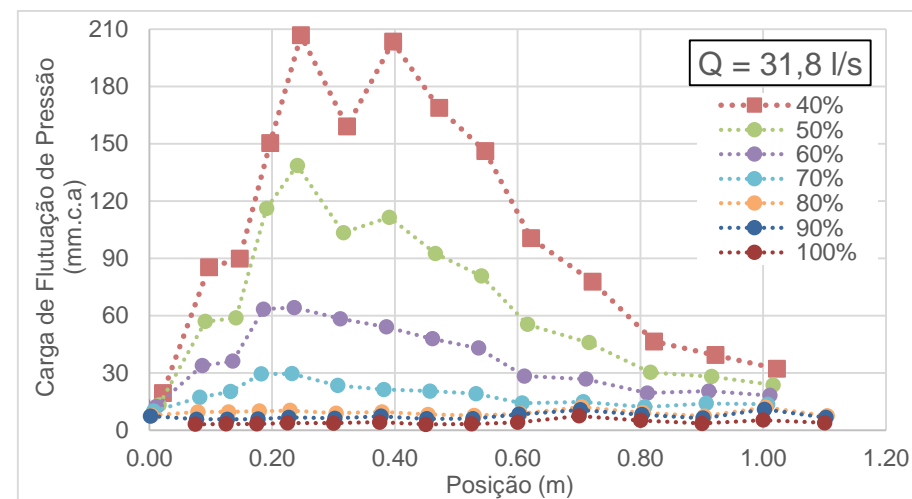


Figura 112- Comportamento das flutuações de pressão na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice E - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base por abertura

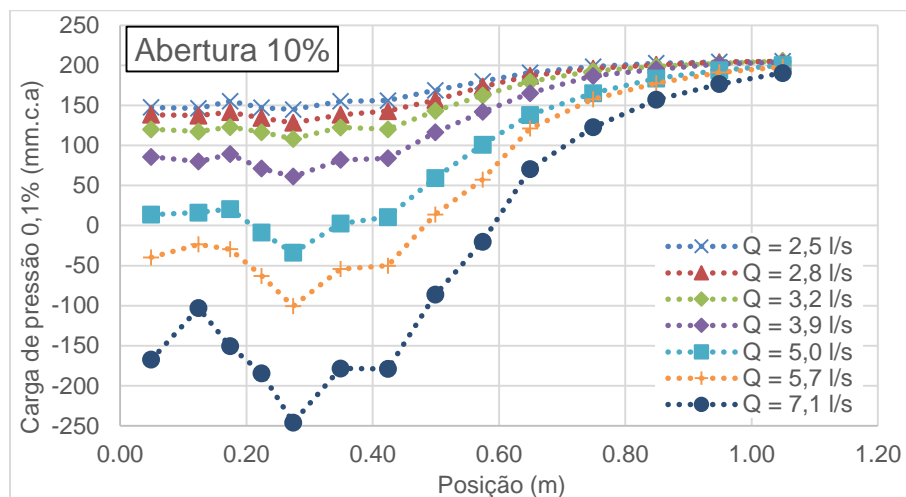


Figura 113 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 10%

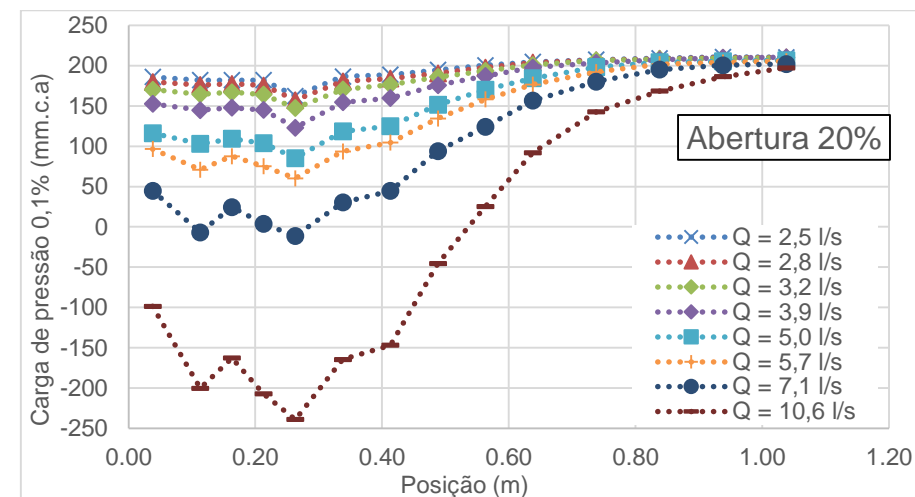


Figura 115- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 20%

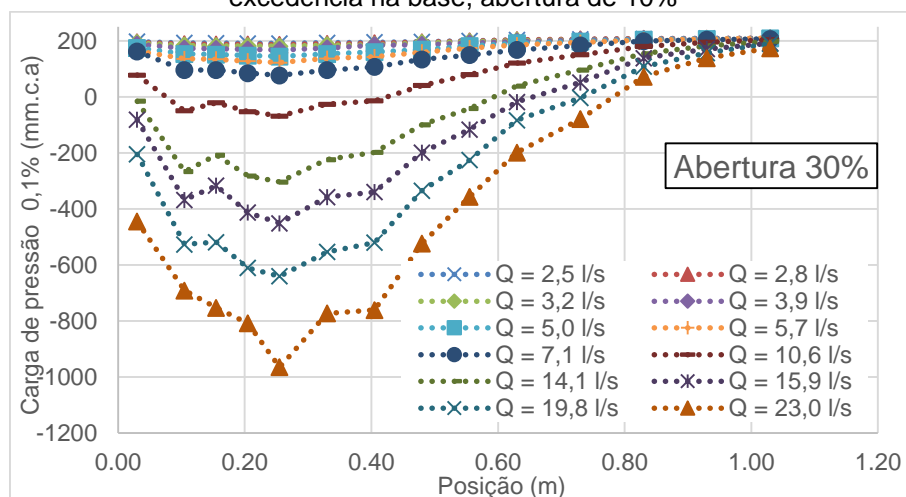


Figura 114 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30%

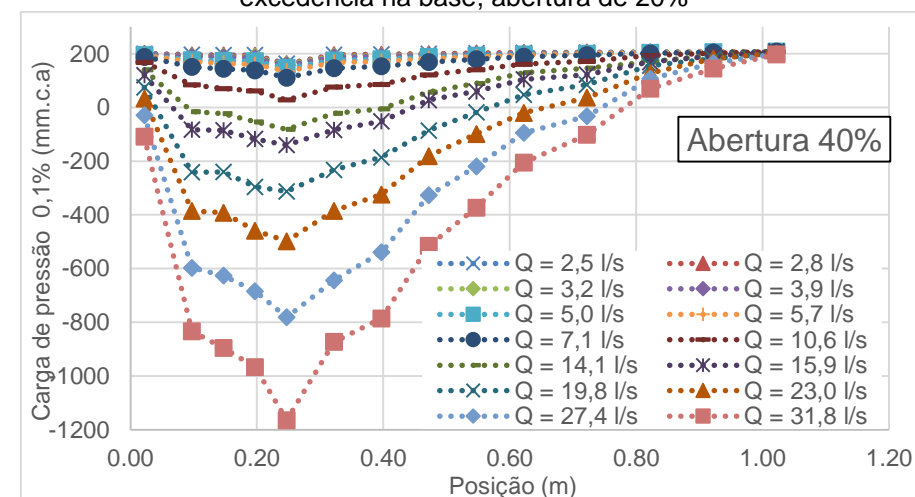


Figura 116 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 40%

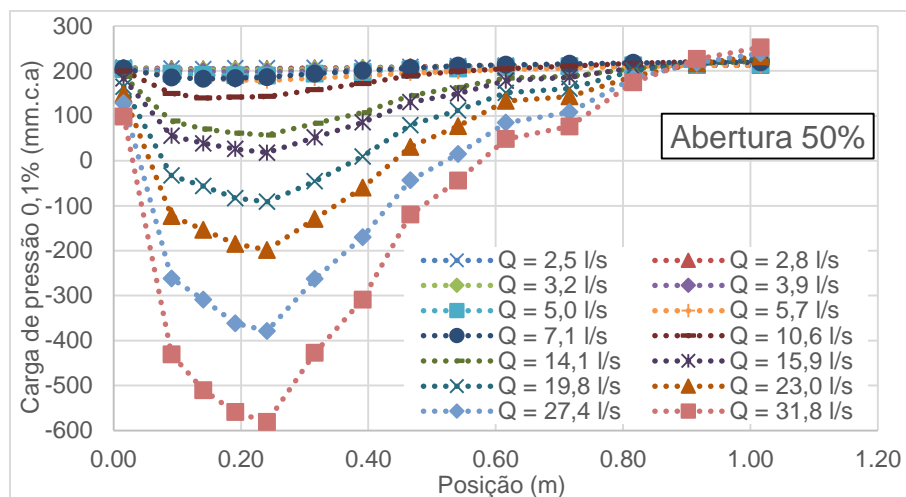


Figura 117- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 50%

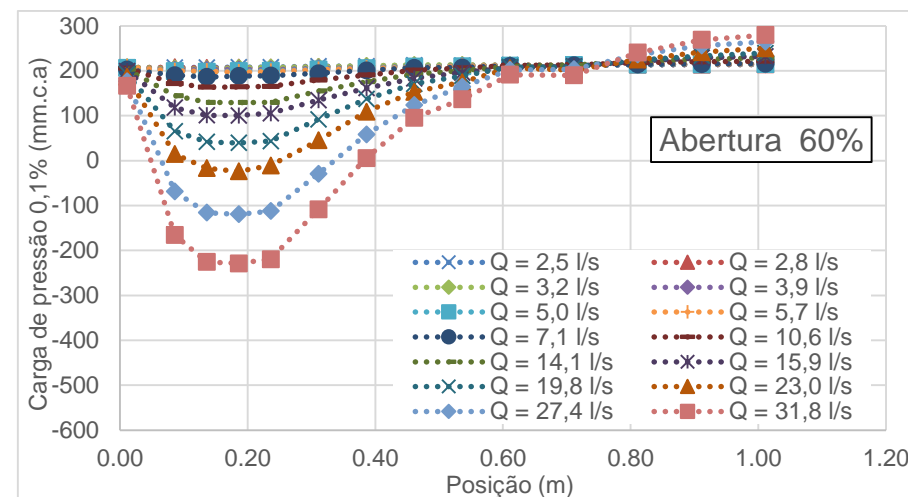


Figura 119- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 60%

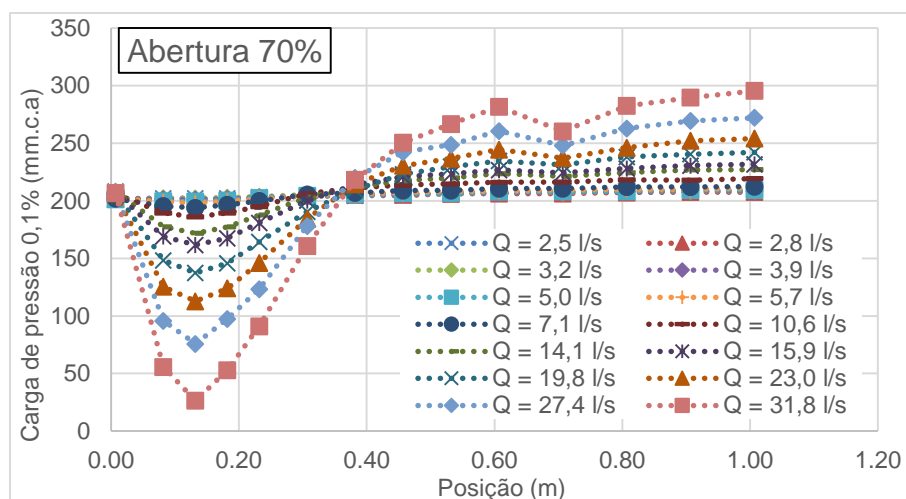


Figura 118- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 70%

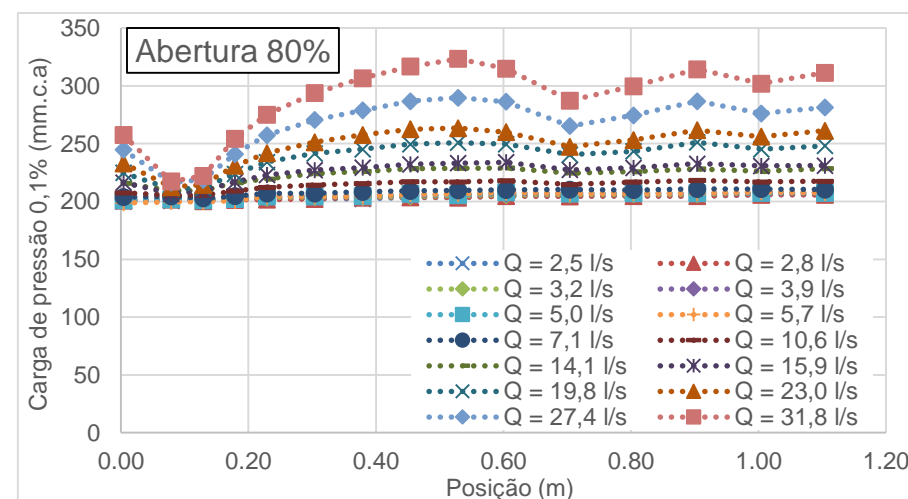


Figura 120- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 80%

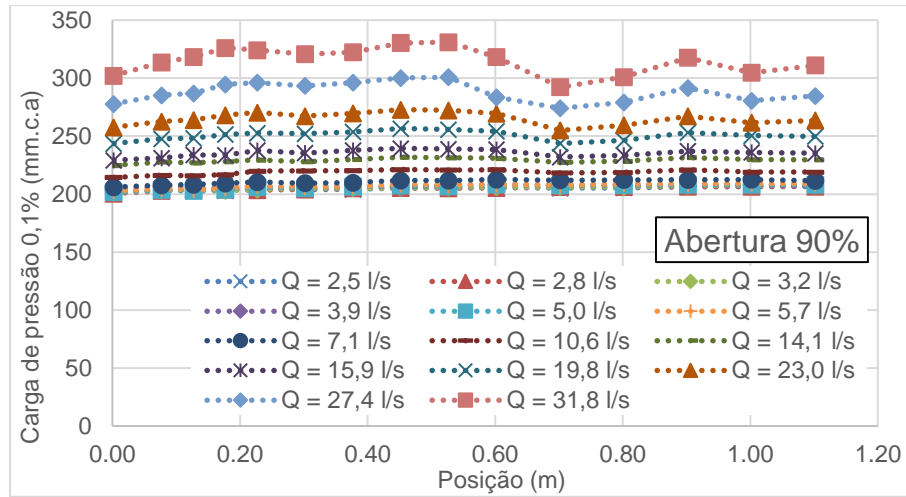


Figura 121- Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 90%

Apêndice F - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base por vazão

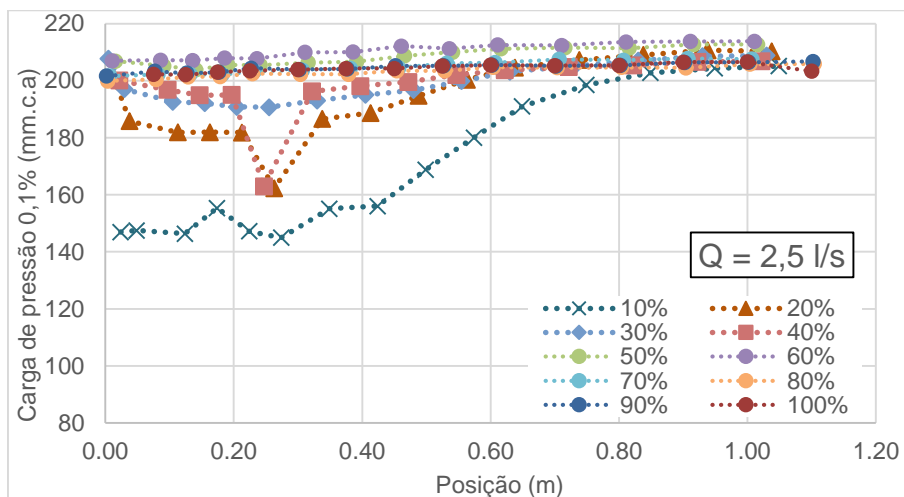


Figura 122 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,5 l/s

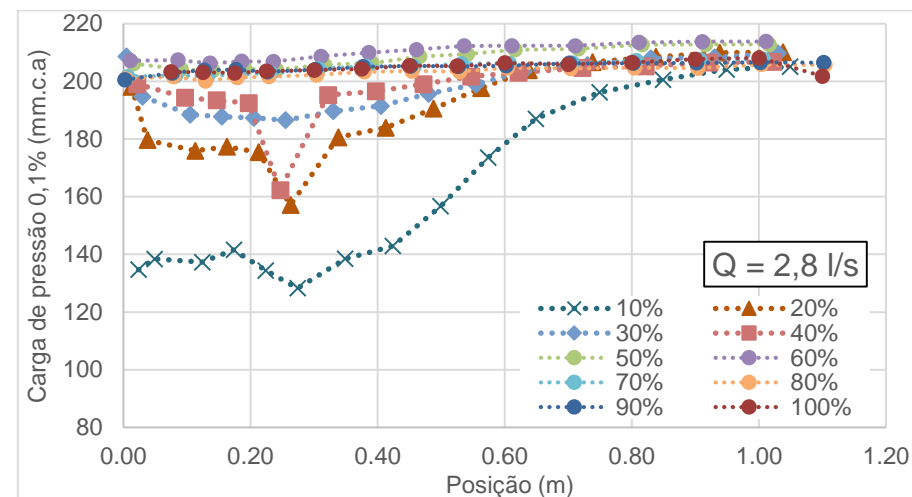


Figura 124 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,8 l/s

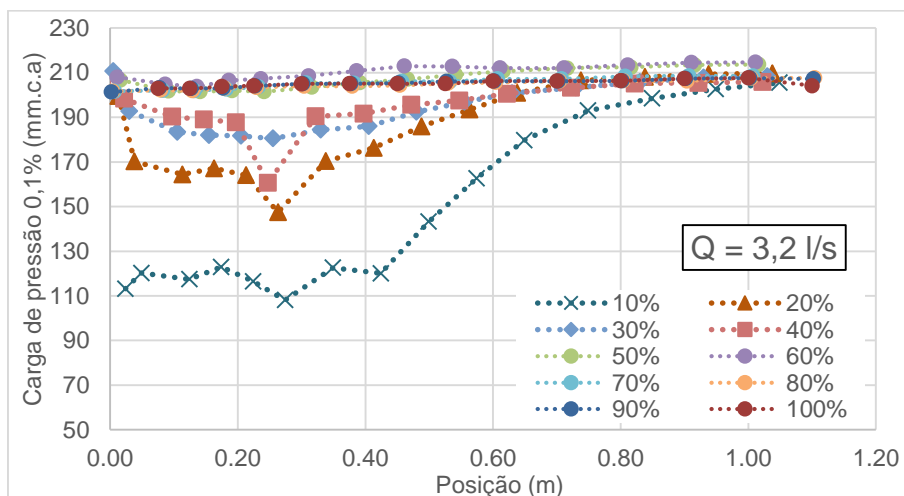


Figura 123 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,2 l/s

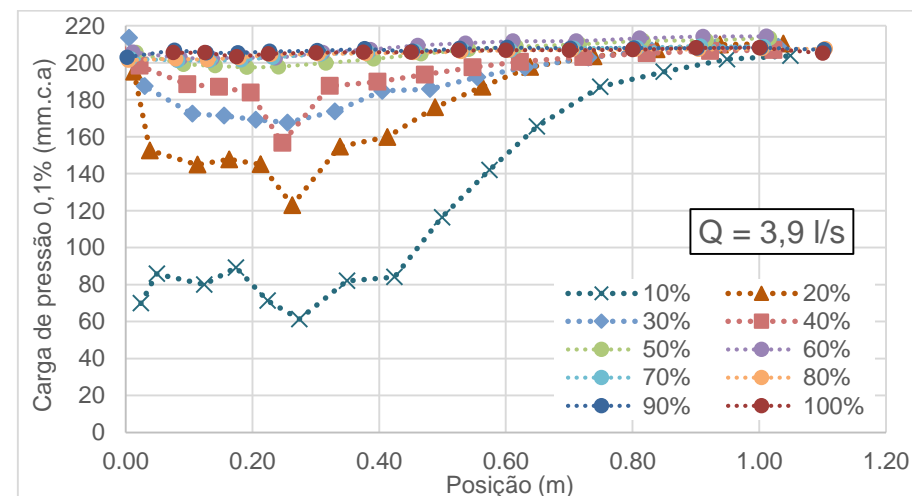


Figura 125 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,9 l/s

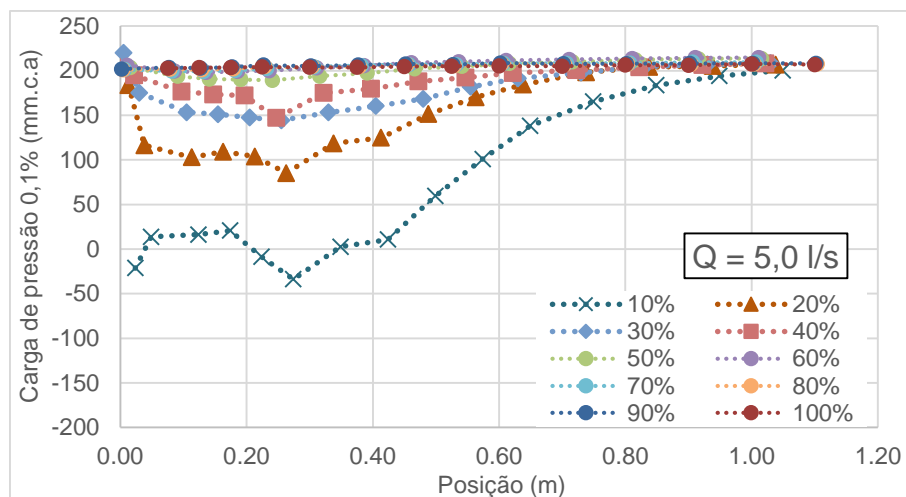


Figura 126 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,0 l/s

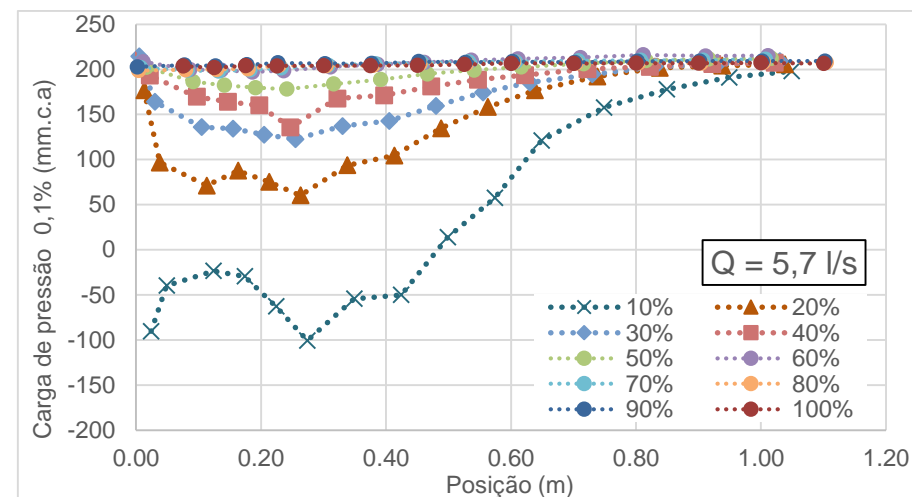


Figura 128 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,7 l/s

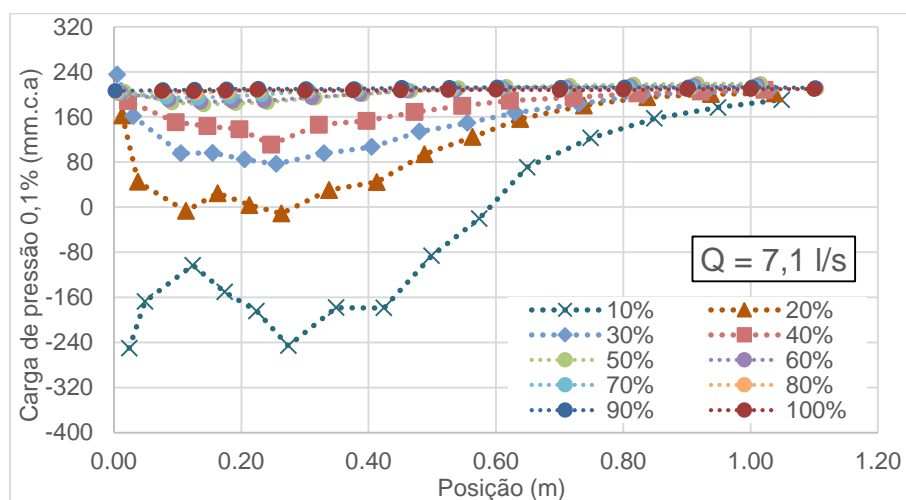


Figura 127 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 7,1 l/s

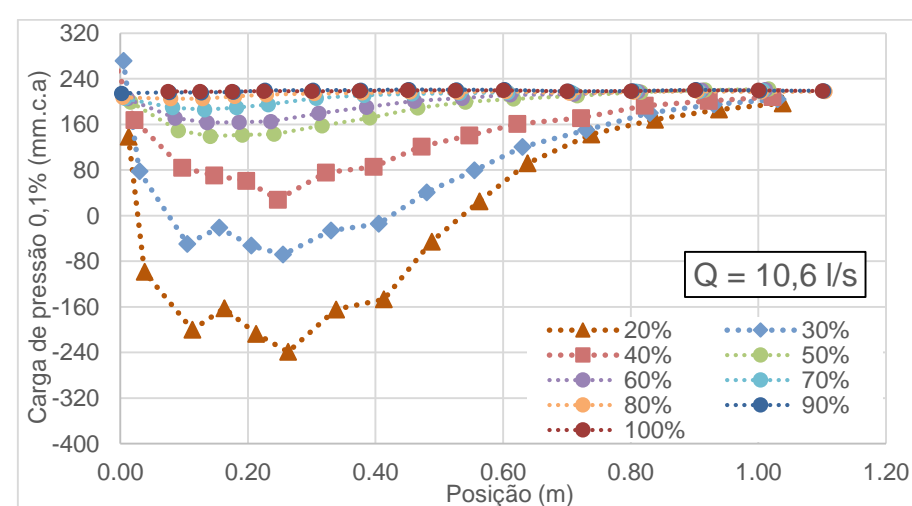


Figura 129 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 10,6 l/s

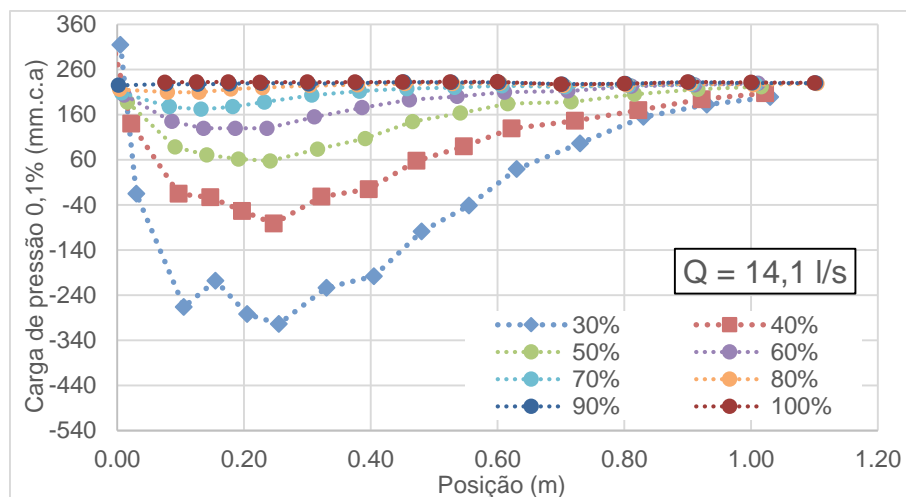


Figura 130 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 14,1 l/s

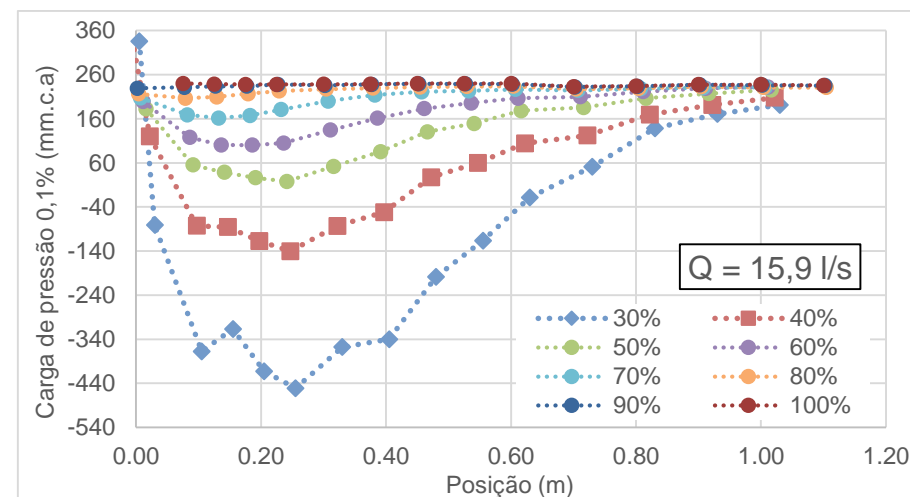


Figura 132 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 15,9 l/s

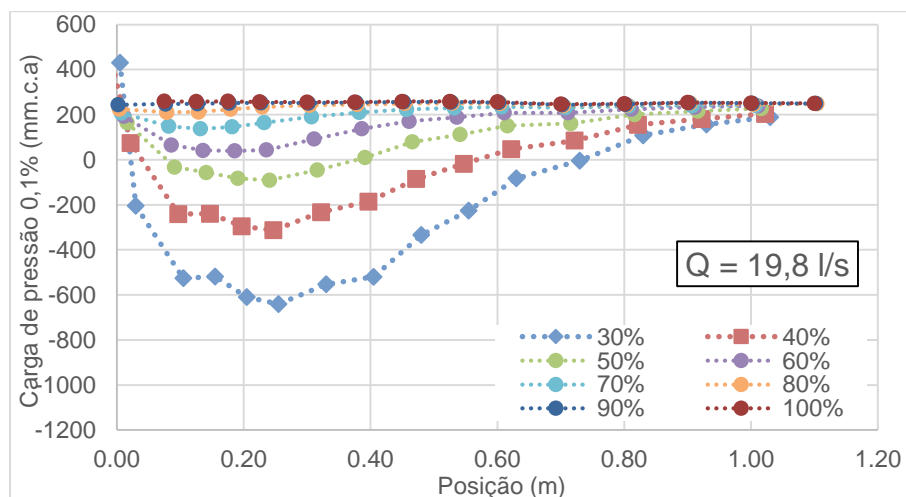


Figura 131 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 19,8 l/s

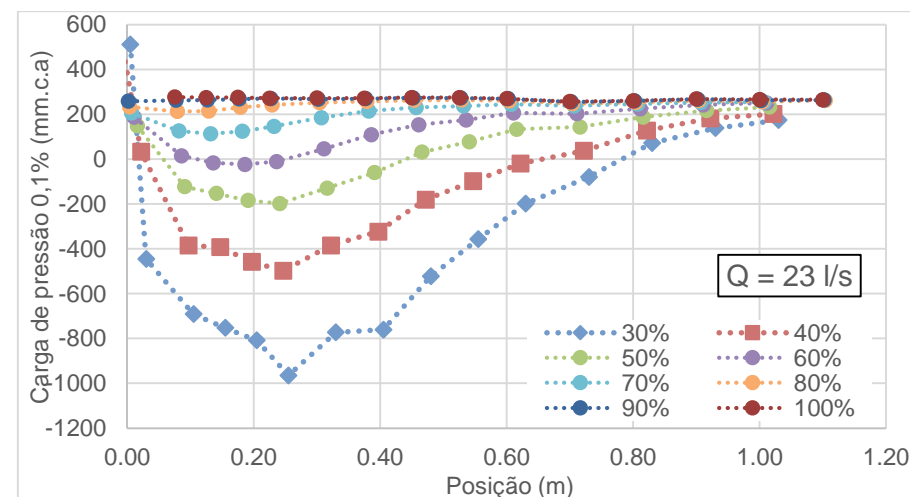


Figura 133 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 23 l/s

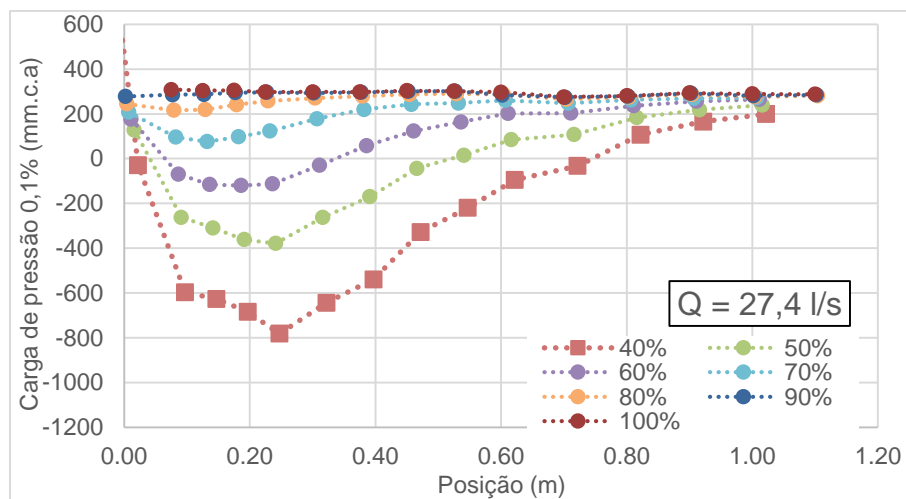


Figura 134 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 27,4 l/s

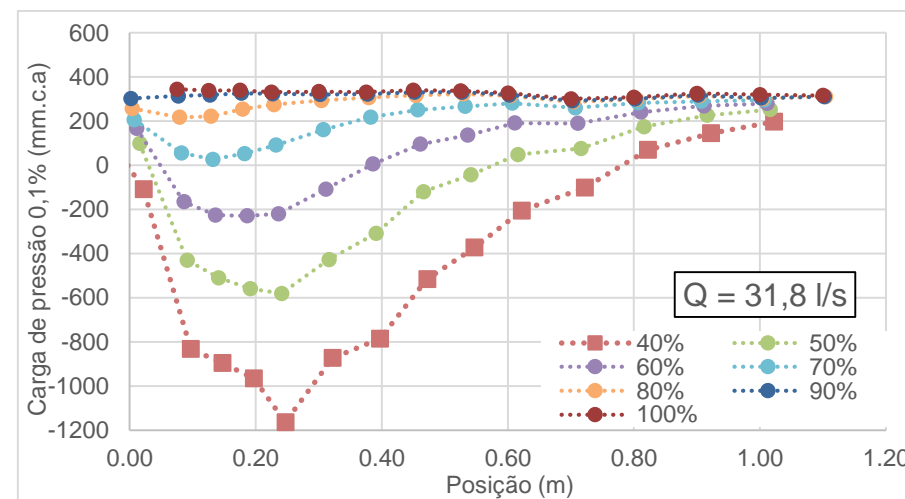


Figura 135 - Comportamento das pressões 0,1% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice G - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base por abertura

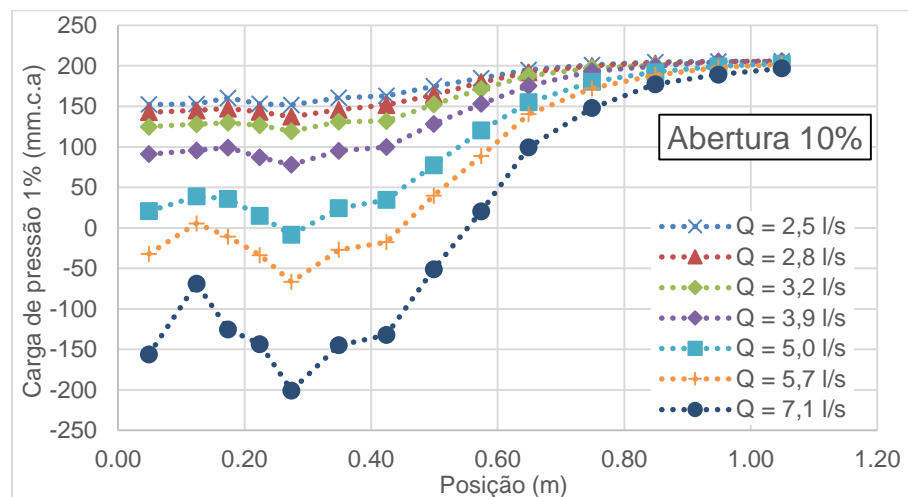


Figura 136 - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 10%

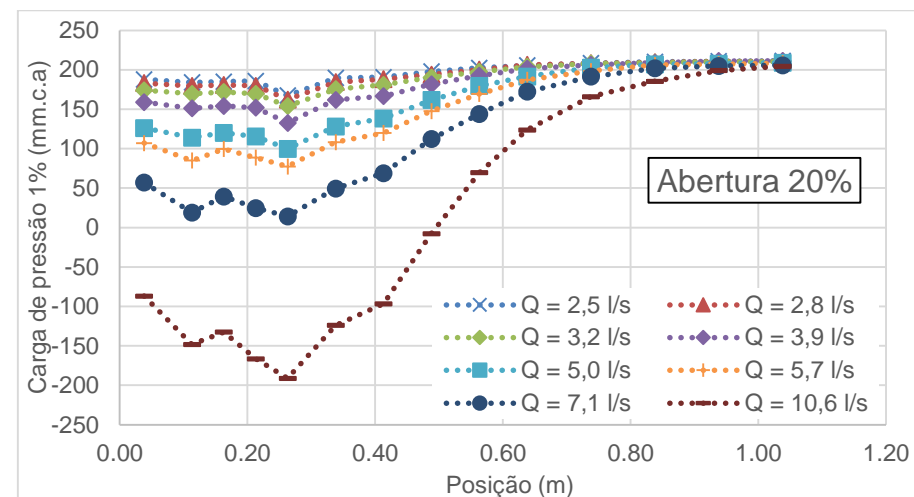


Figura 138 - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 20%

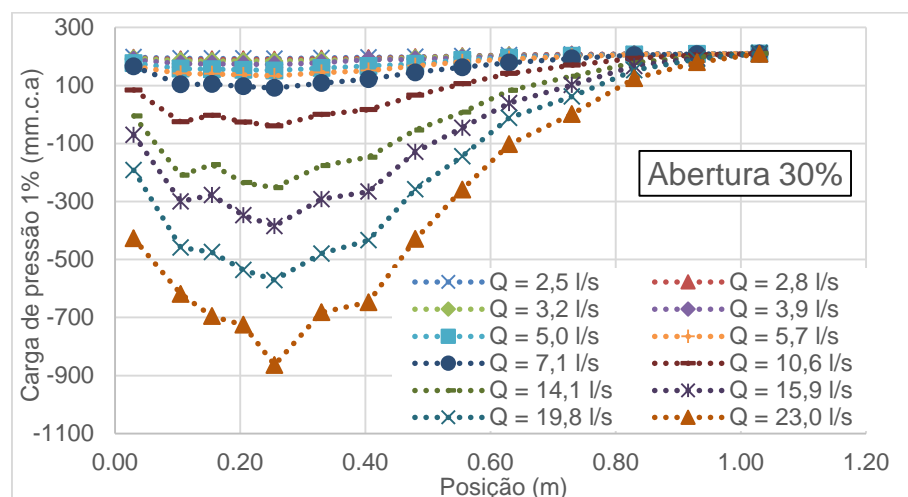


Figura 137 - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30%

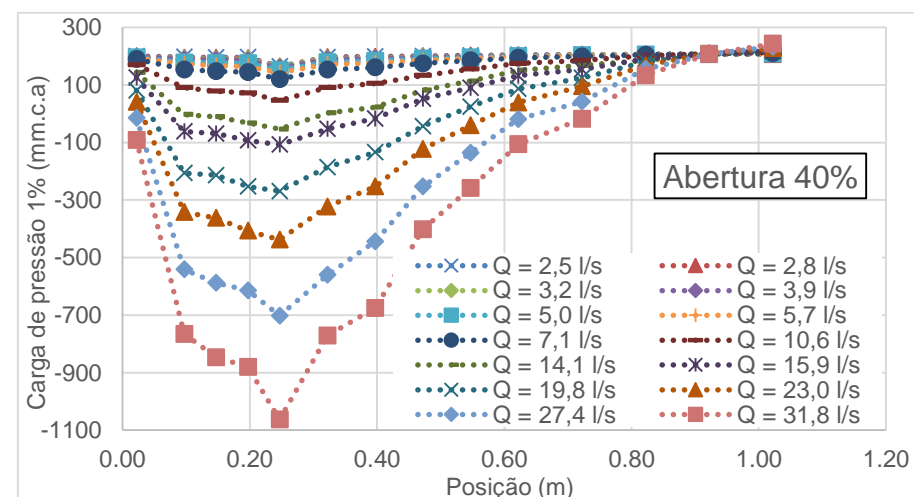
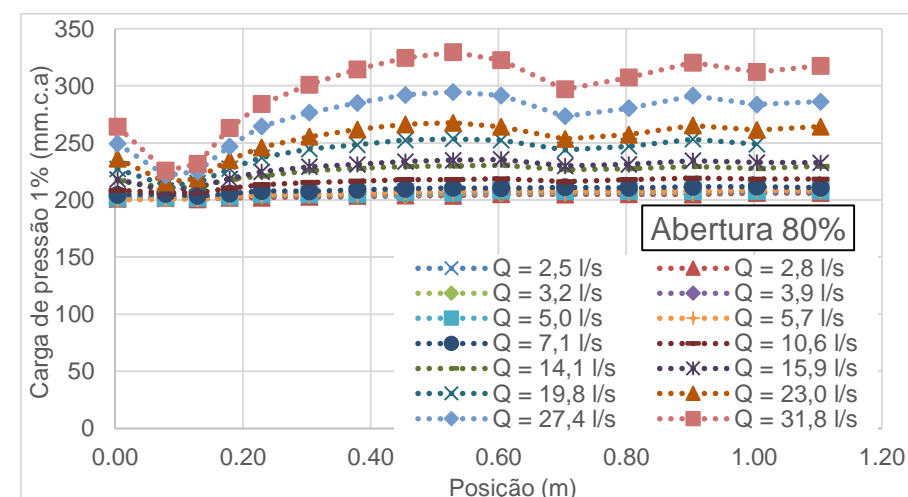
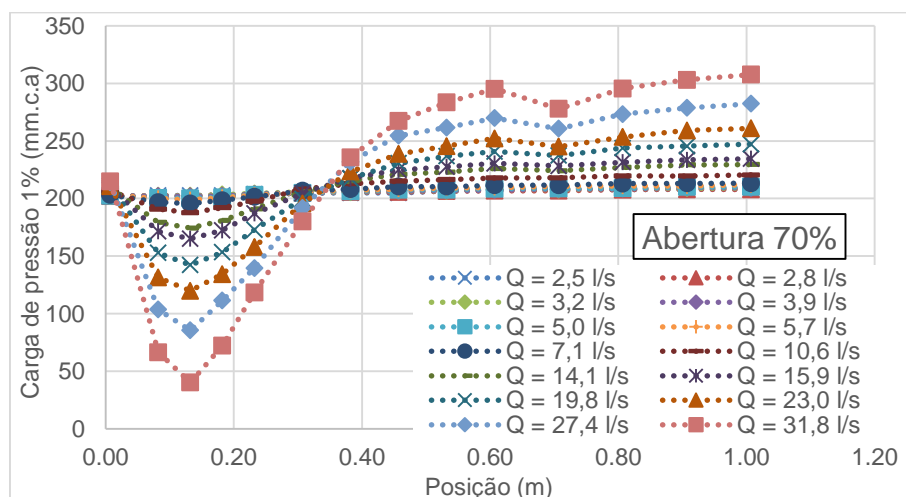
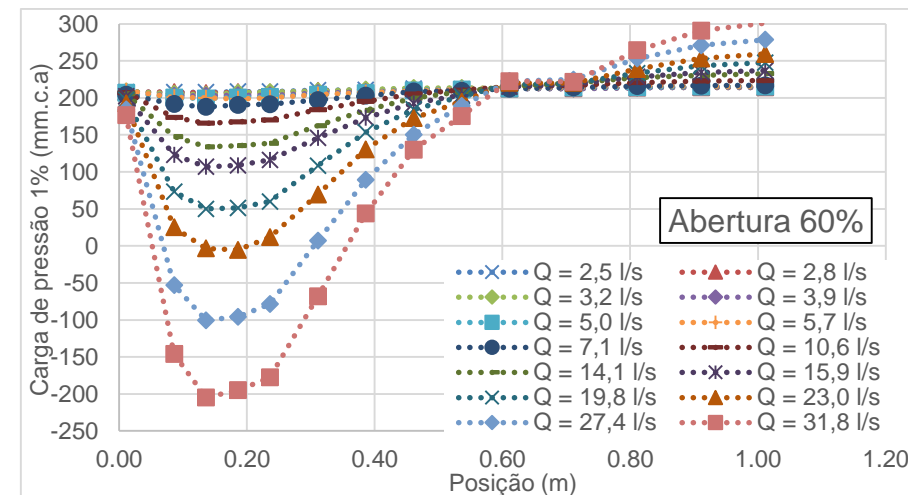
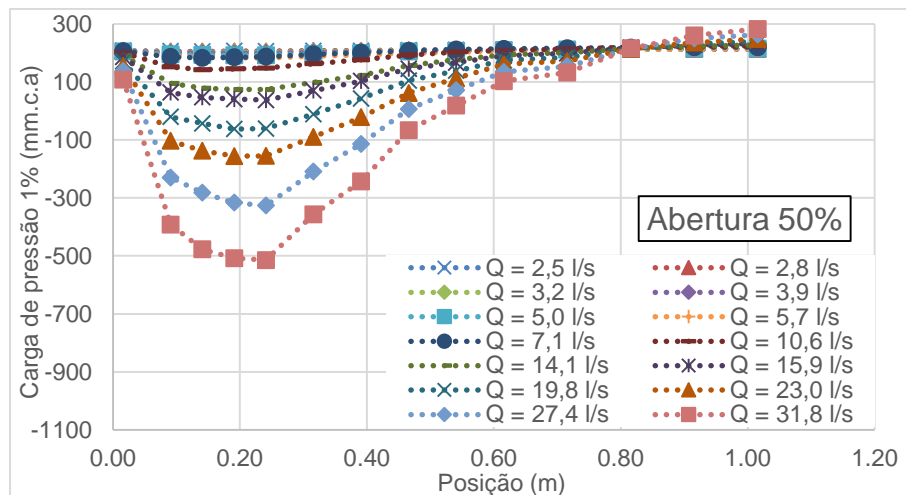


Figura 139 - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 40%



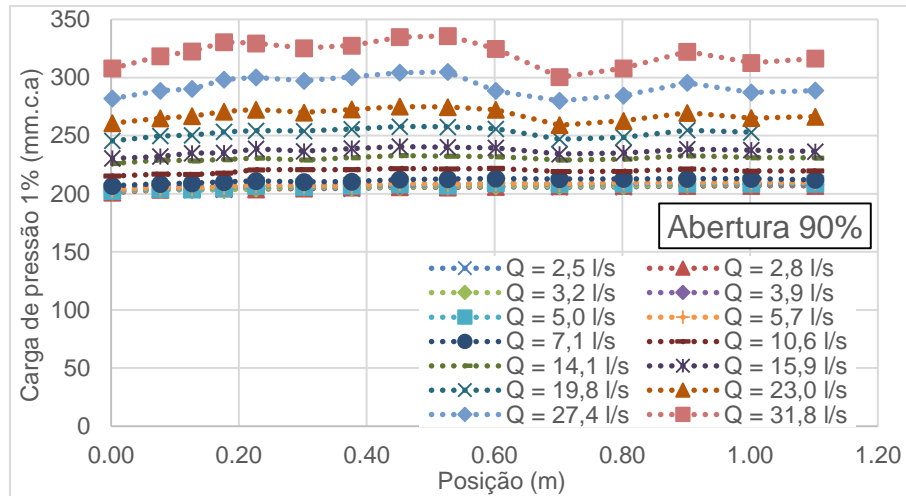


Figura 144 - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 90%

Apêndice H - Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base por vazão

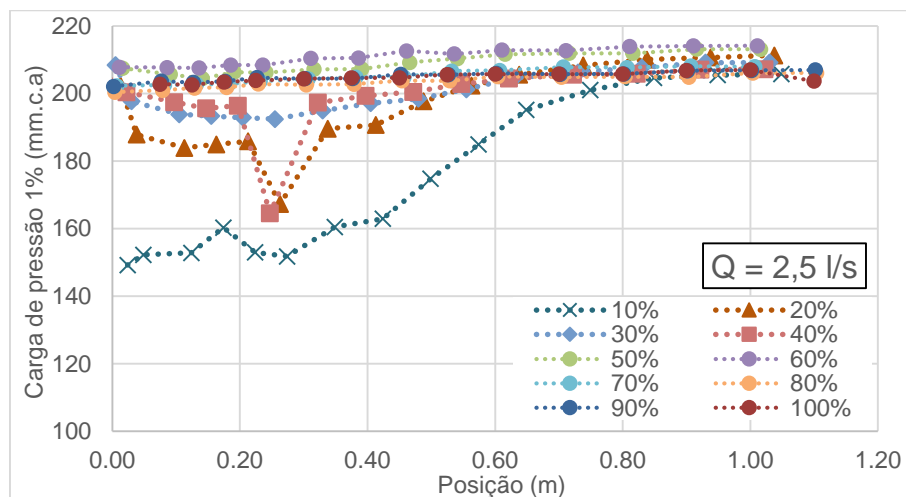


Figura 145- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,5 l/s

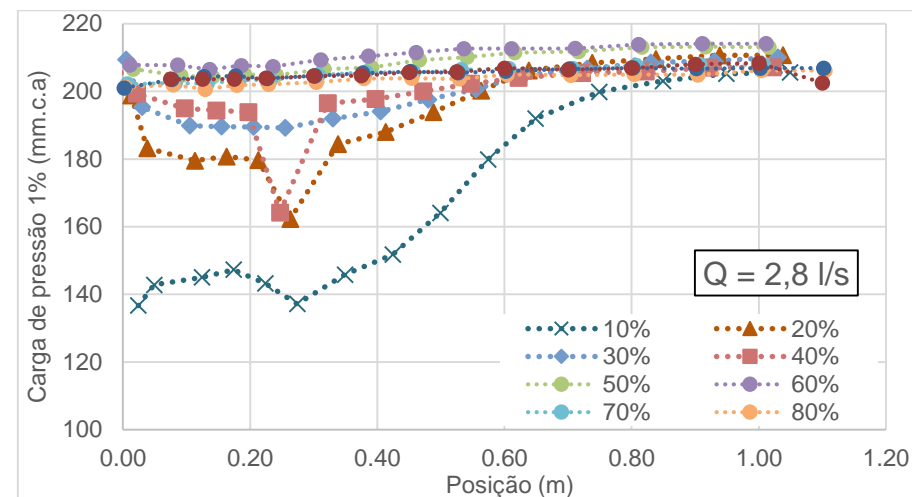


Figura 147- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,8 l/s

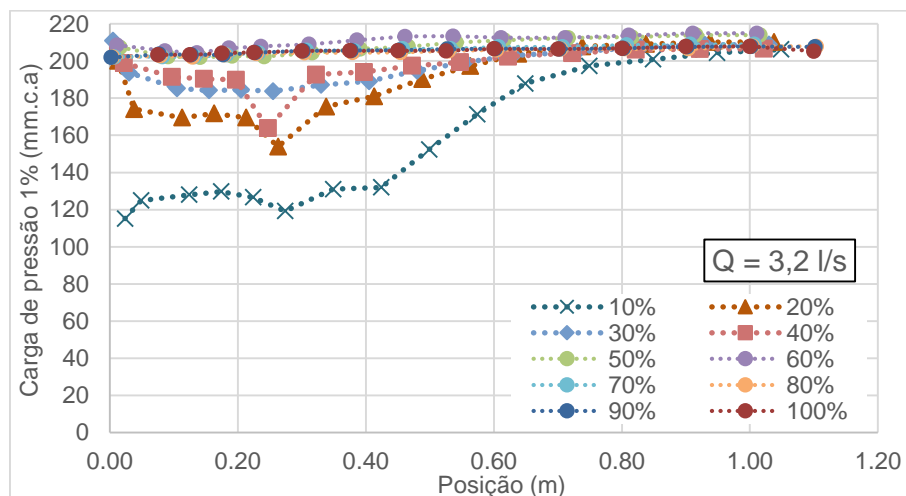


Figura 146- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,2 l/s

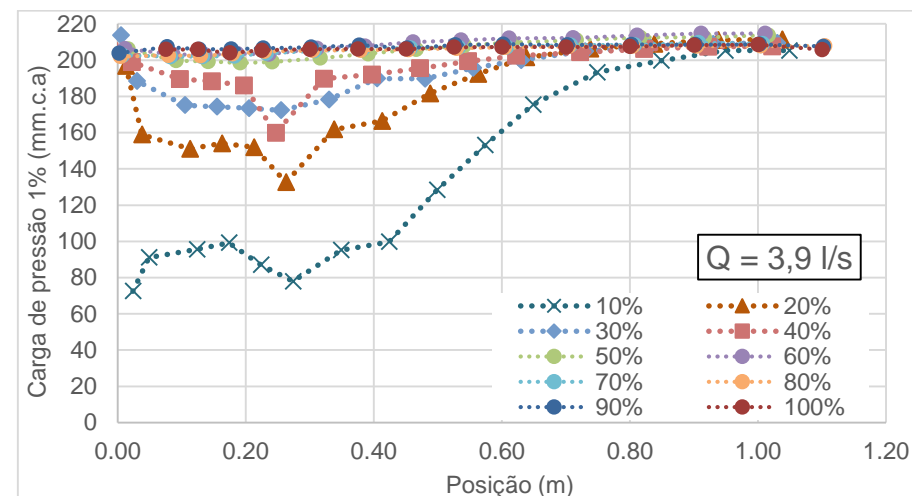


Figura 148- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,9 l/s

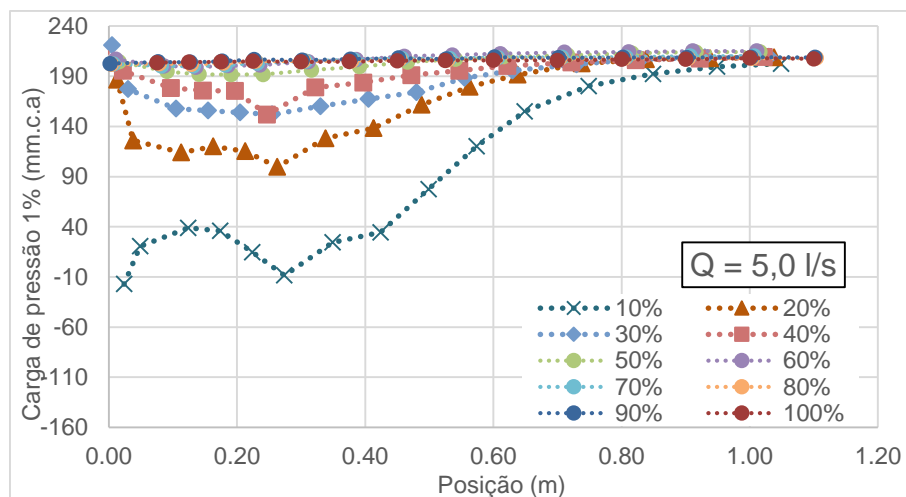


Figura 149- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,0 l/s

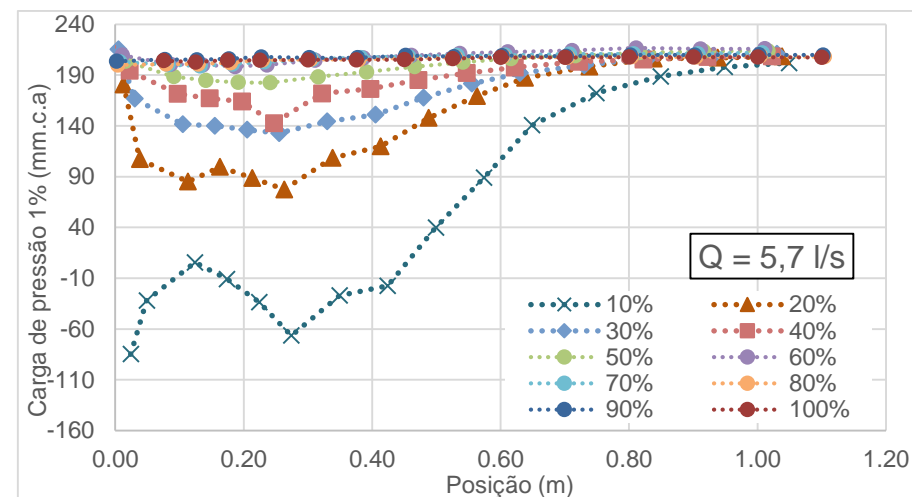


Figura 151- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,7 l/s

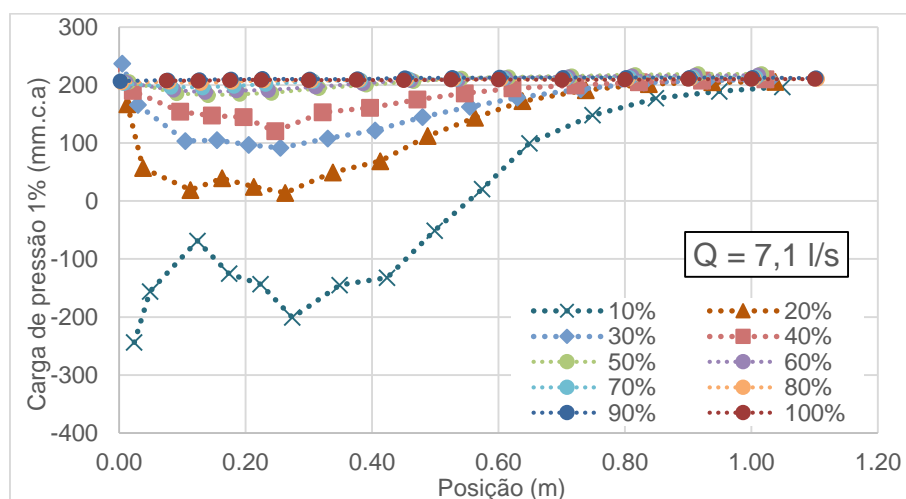


Figura 150- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 7,1 l/s

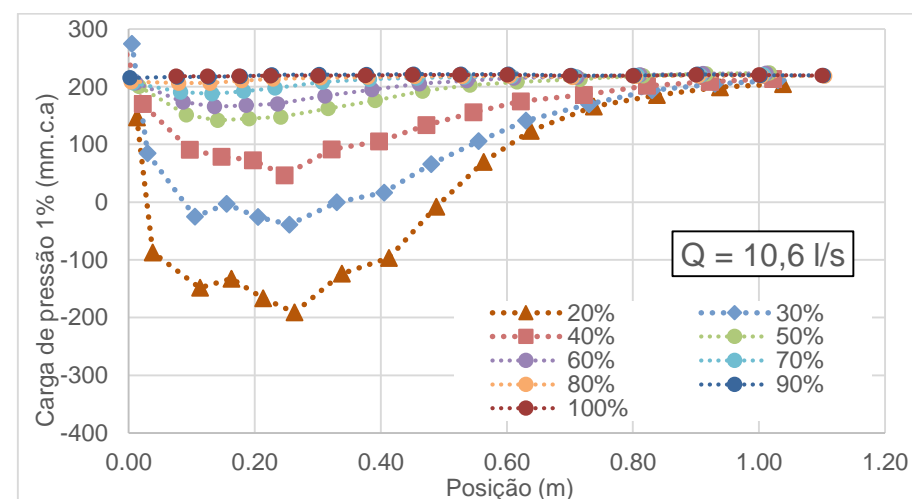


Figura 152- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 10,6 l/s

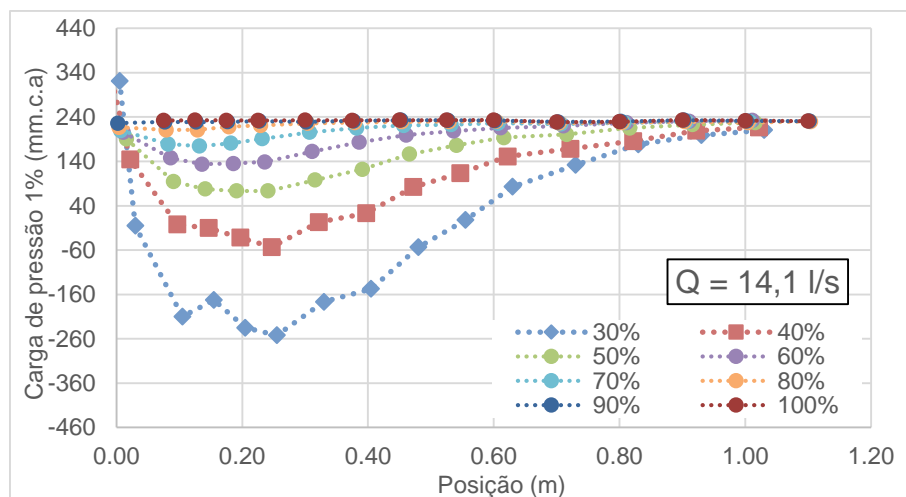


Figura 153- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 14,1 l/s

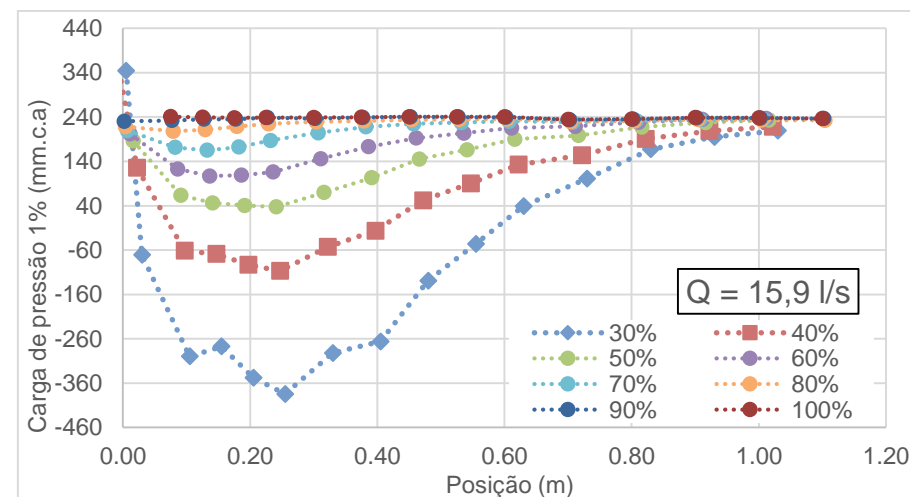


Figura 155- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 15,9 l/s

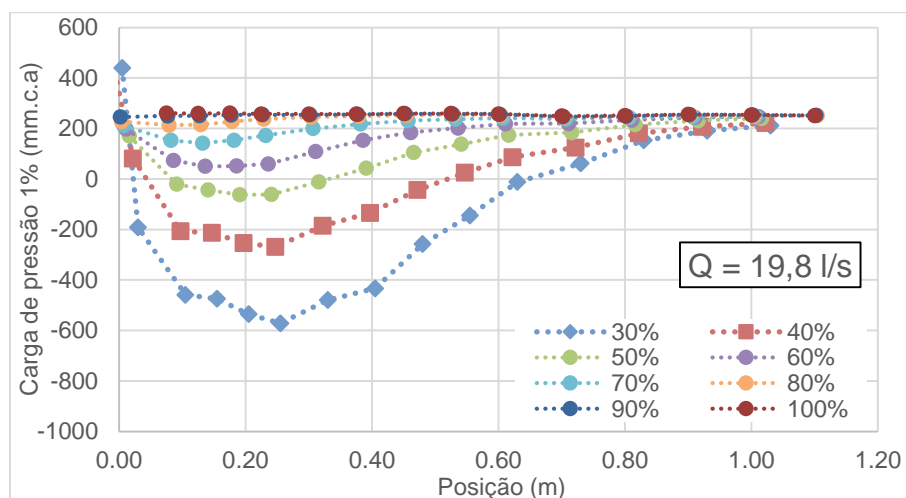


Figura 154- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 19,8 l/s

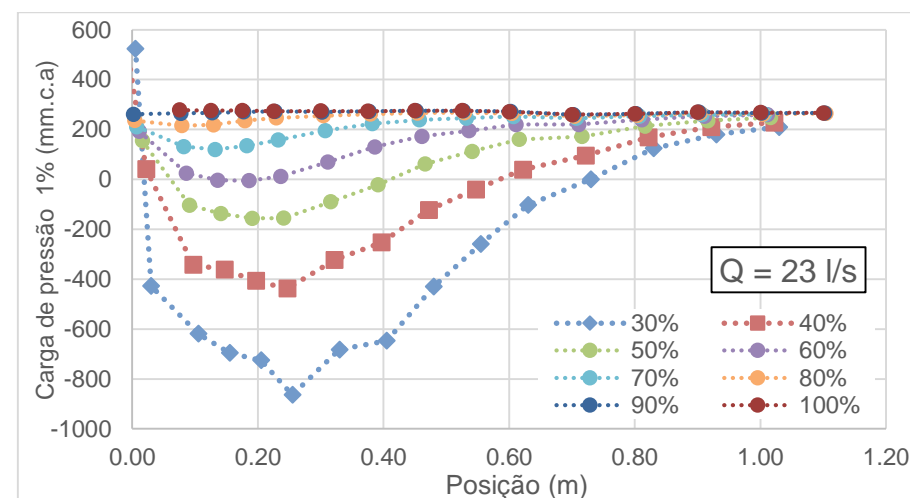


Figura 156- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 23 l/s

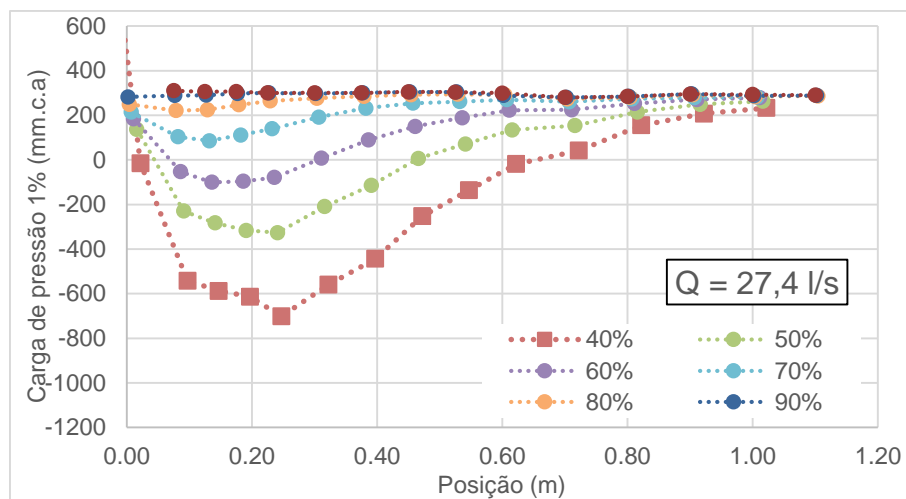


Figura 157- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 27,4 l/s

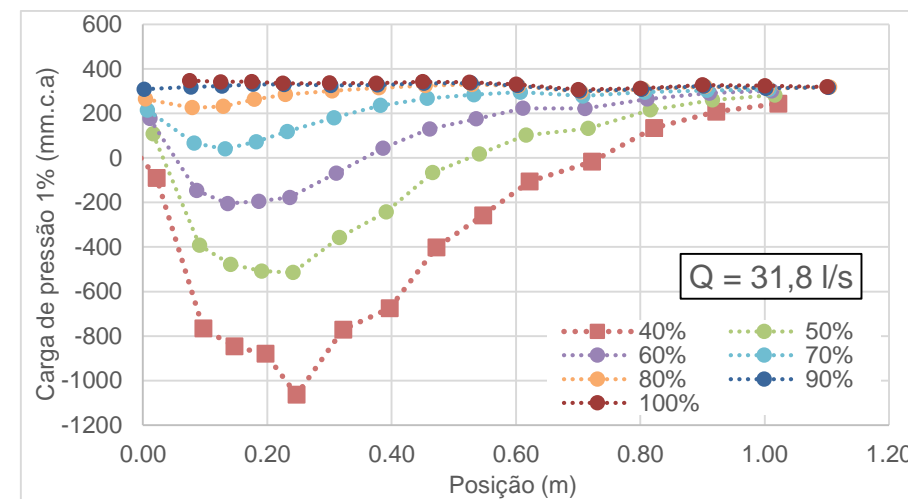


Figura 158- Comportamento das pressões 1,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice I - Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base por abertura

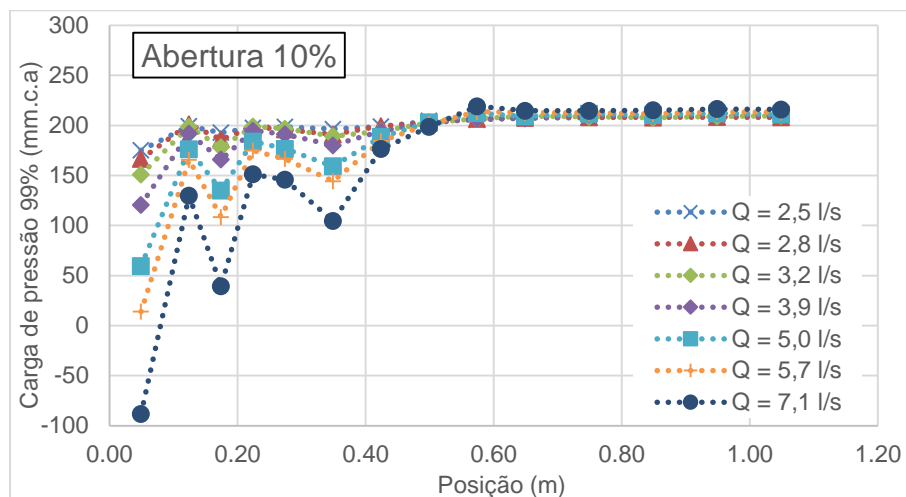


Figura 159- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 10%

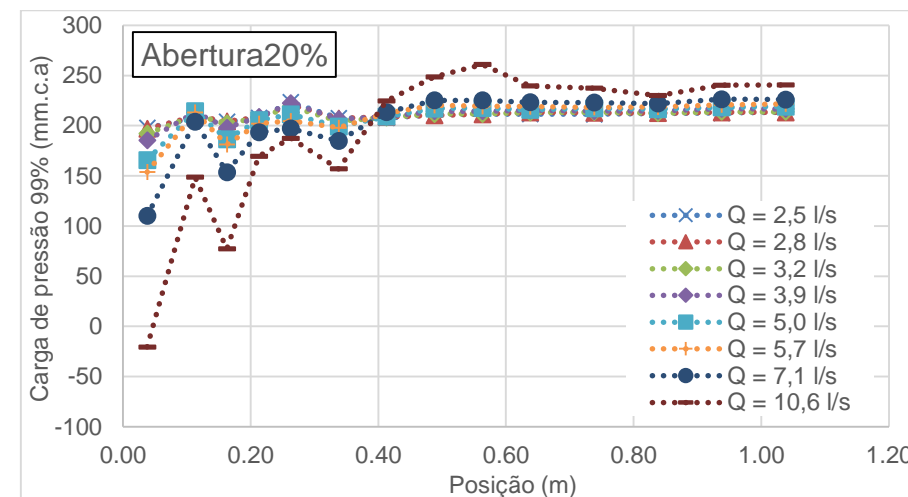


Figura 161- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 20%

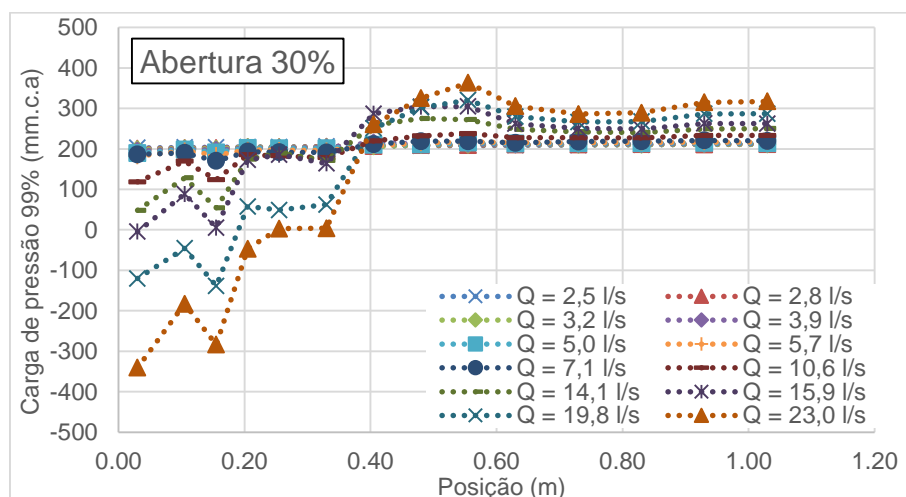


Figura 160- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30%

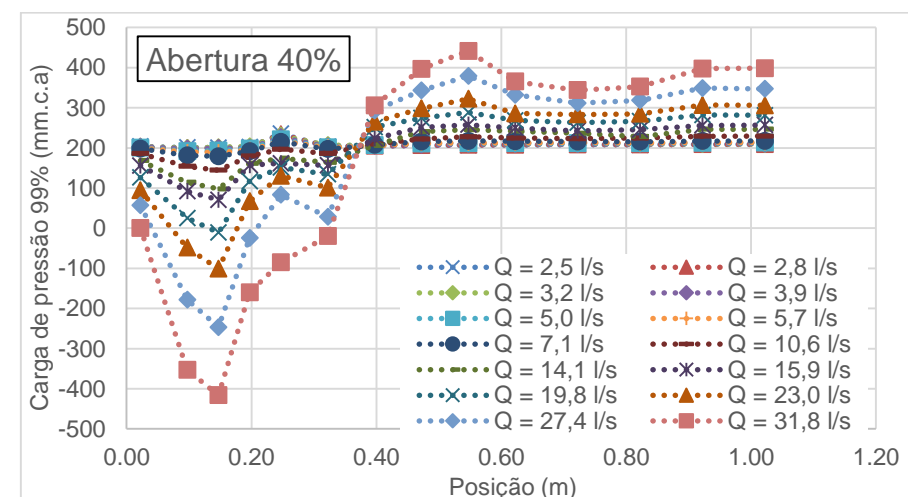


Figura 162- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 40%

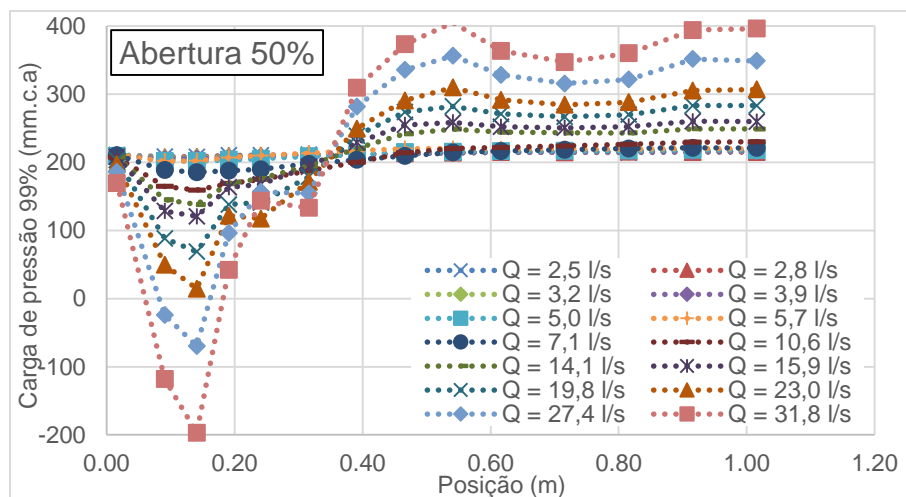


Figura 163- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 50%

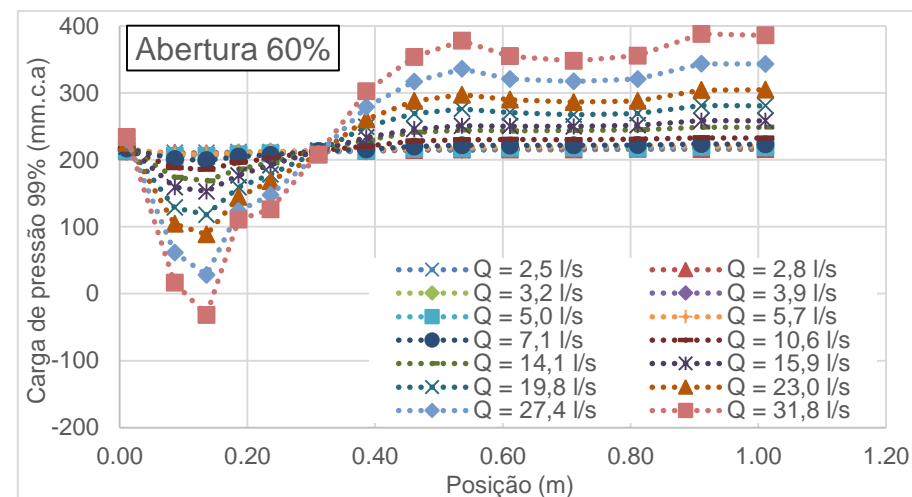


Figura 165- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 60%

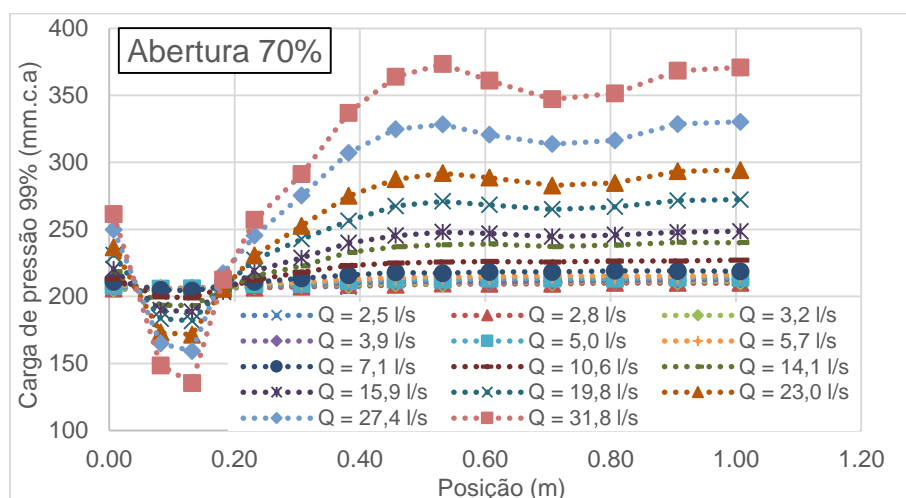


Figura 164- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 70%

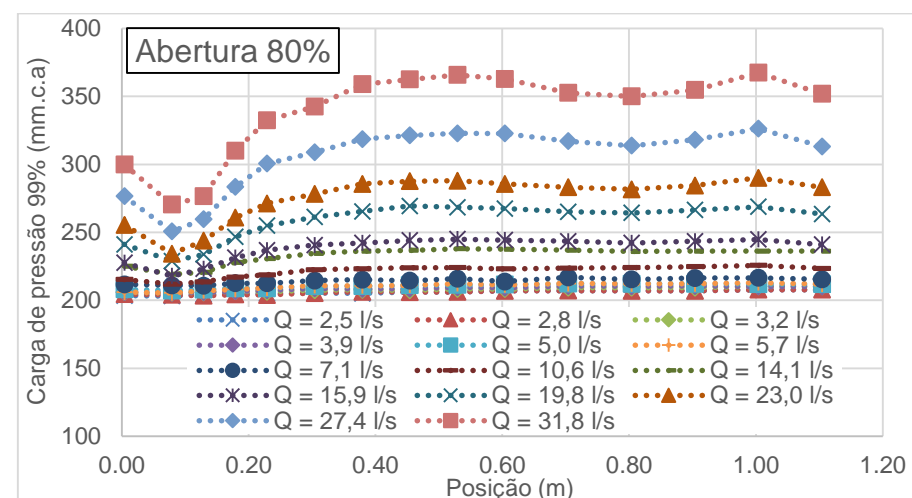


Figura 166- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 80%

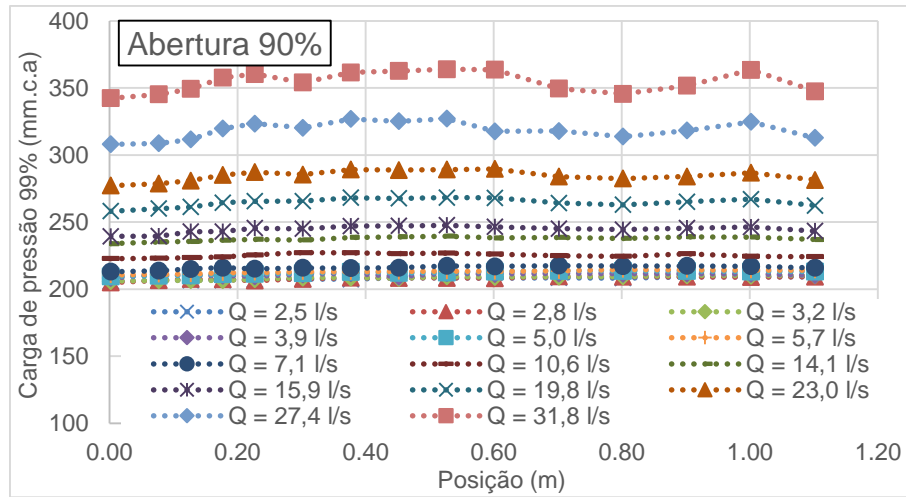


Figura 167- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 90%

Apêndice J - Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base por vazão

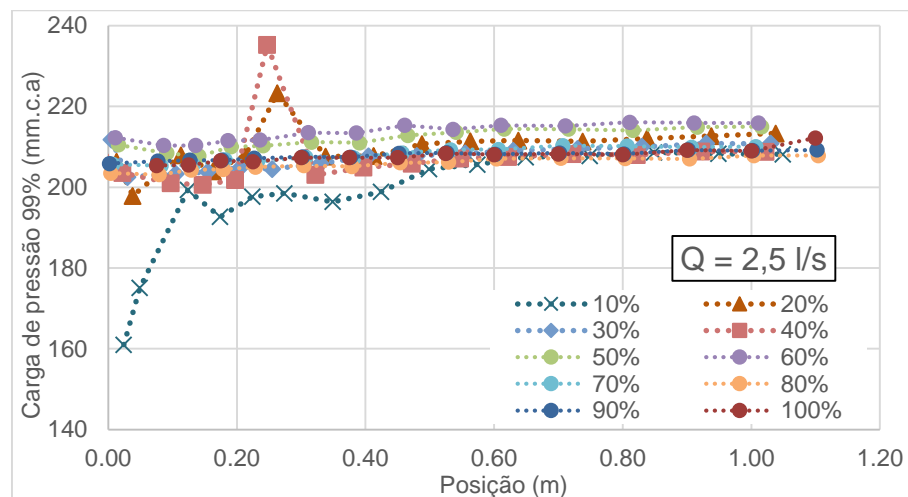


Figura 168- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,5 l/s

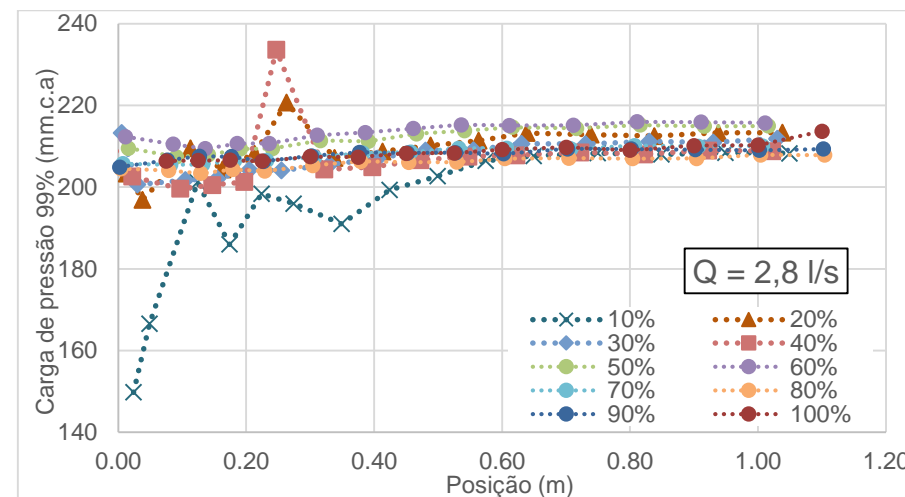


Figura 170- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,8 l/s

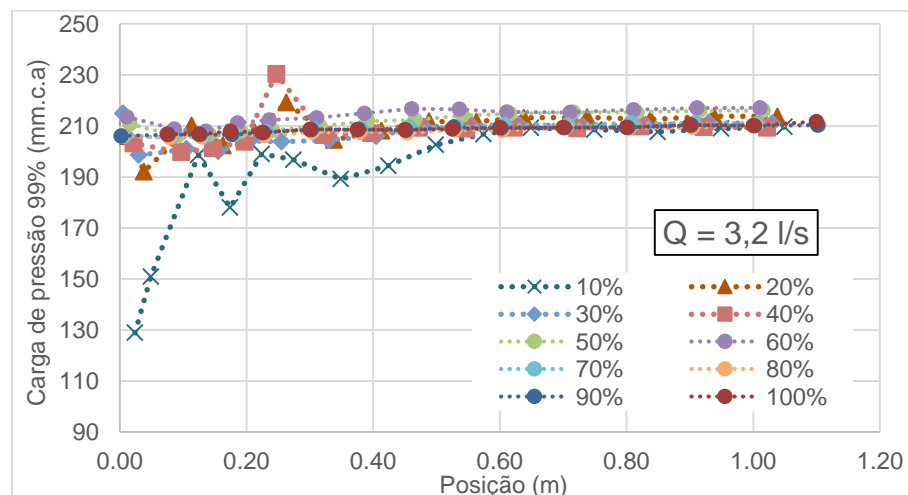


Figura 169- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,2 l/s

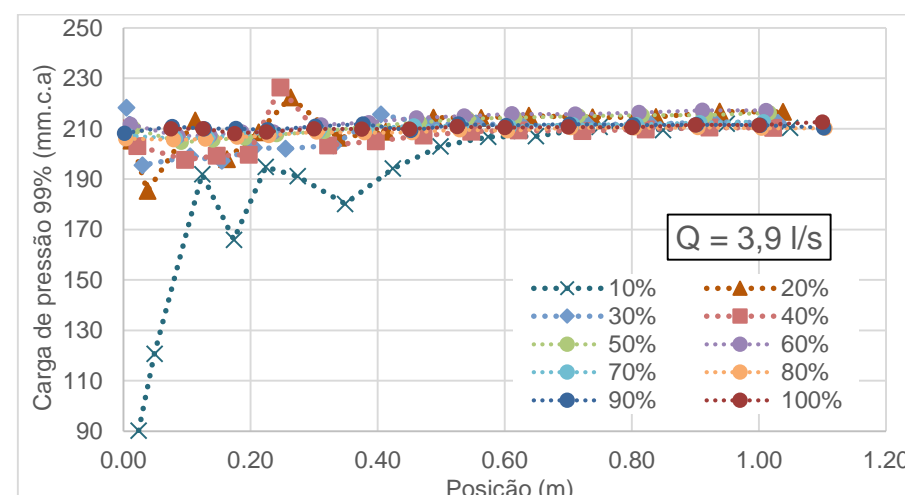


Figura 171- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,9 l/s

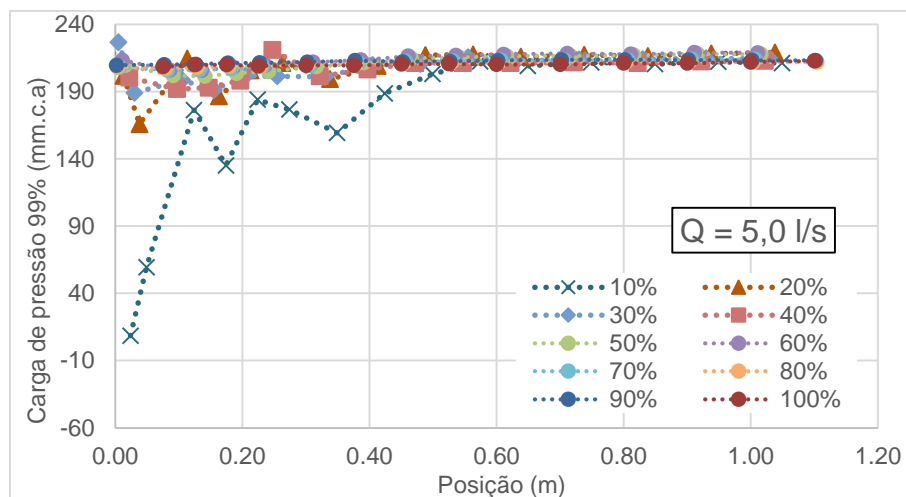


Figura 172- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,0 l/s

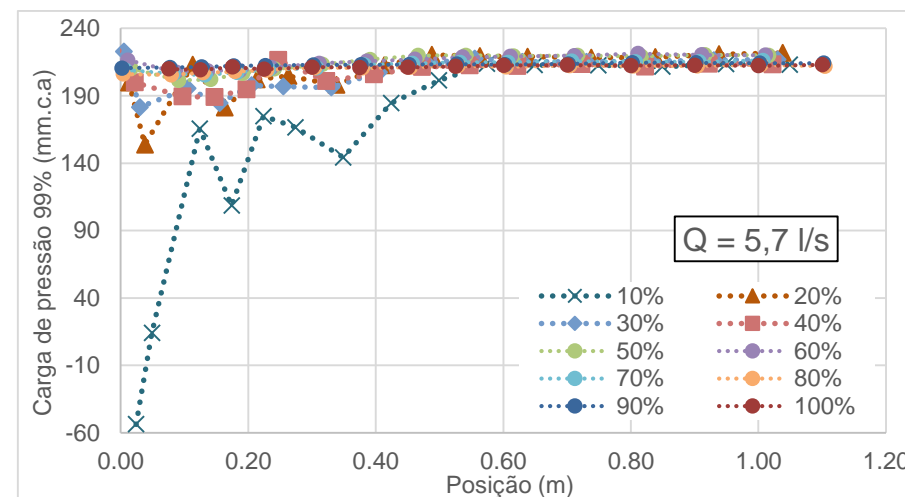


Figura 174- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,7 l/s

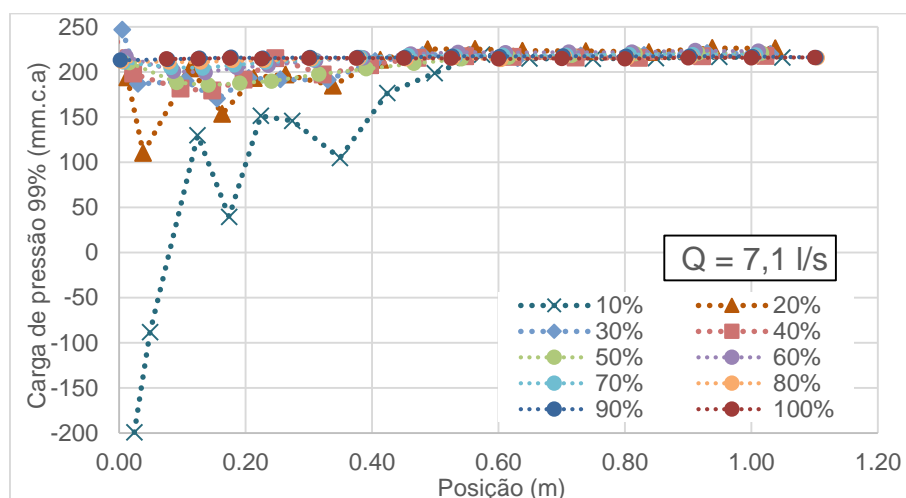


Figura 173- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 7,1 l/s

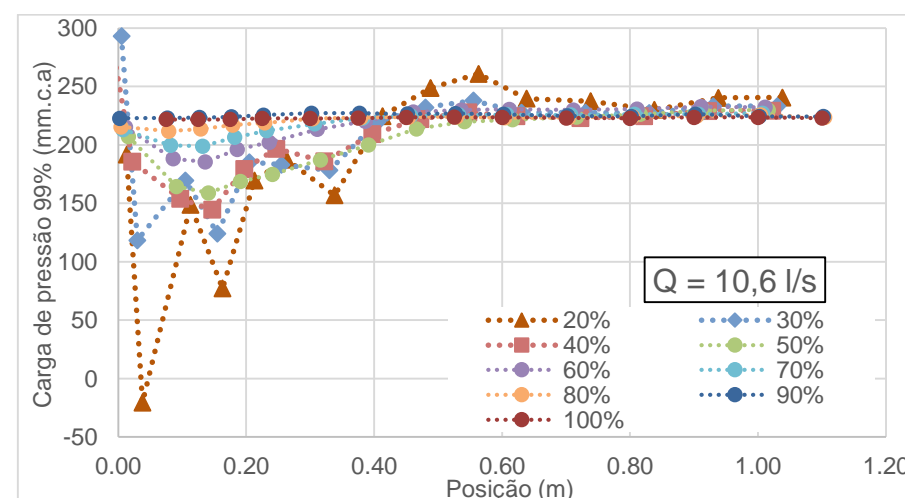


Figura 175- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 10,6 l/s

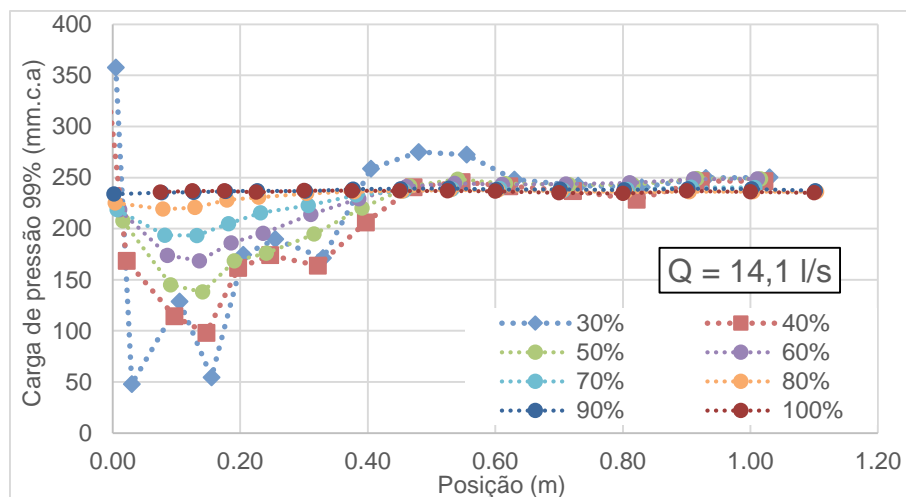


Figura 176- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 14,1 l/s

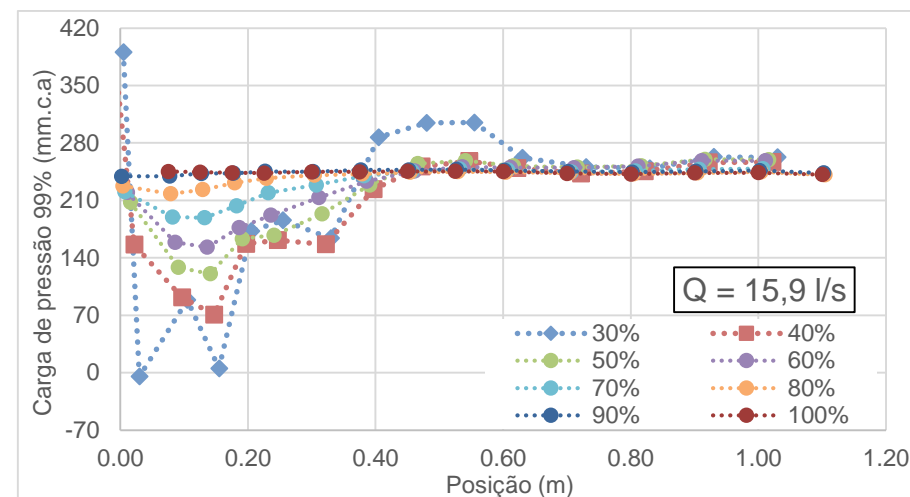


Figura 178 - - Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 15,9 l/s

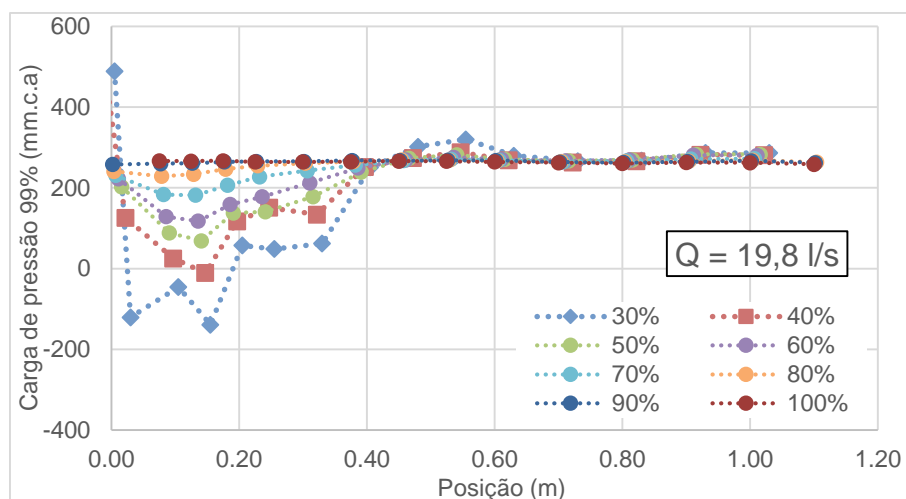


Figura 177- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 19,8 l/s

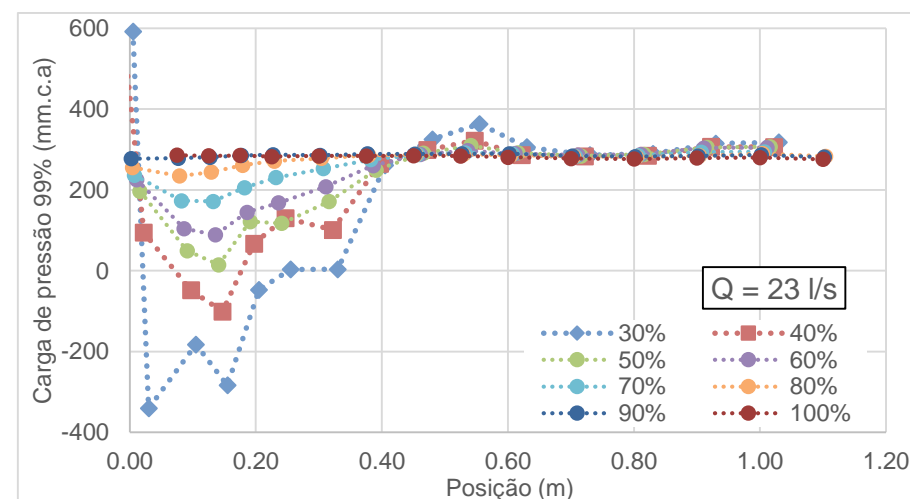


Figura 179- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 23 l/s

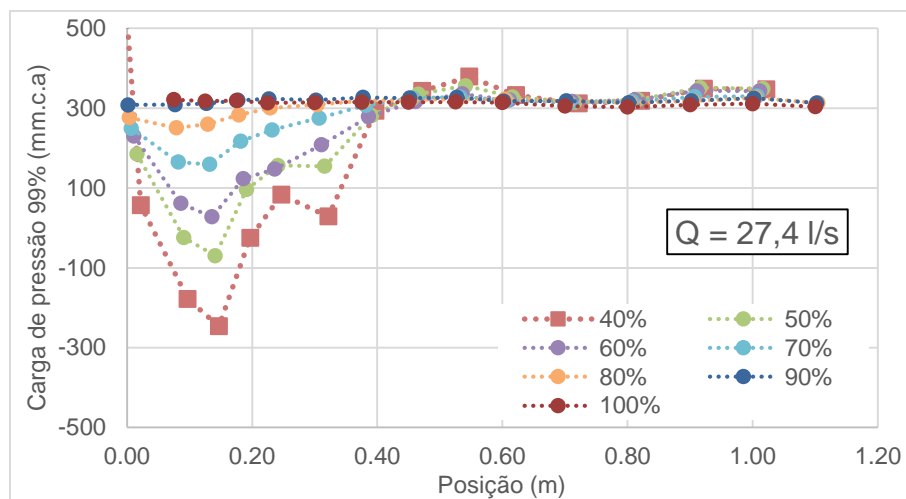


Figura 180- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 27,4 l/s

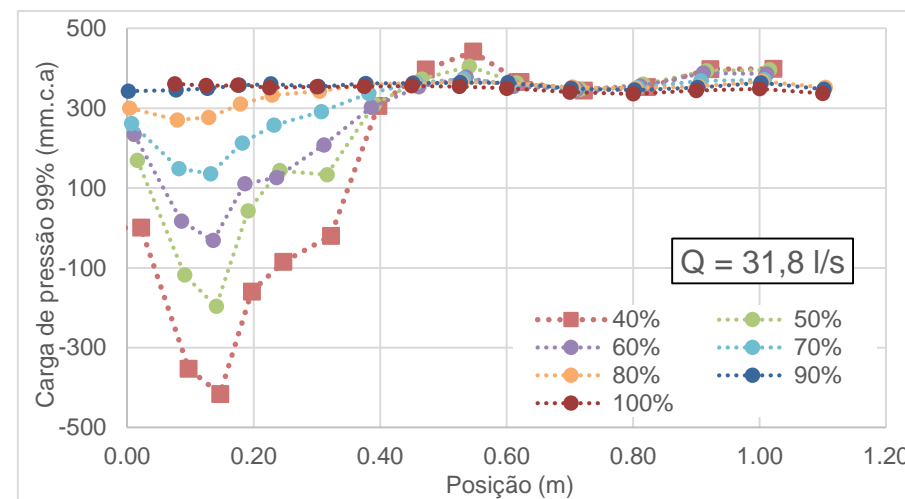


Figura 181- Comportamento das pressões 99,0% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice K - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base por abertura

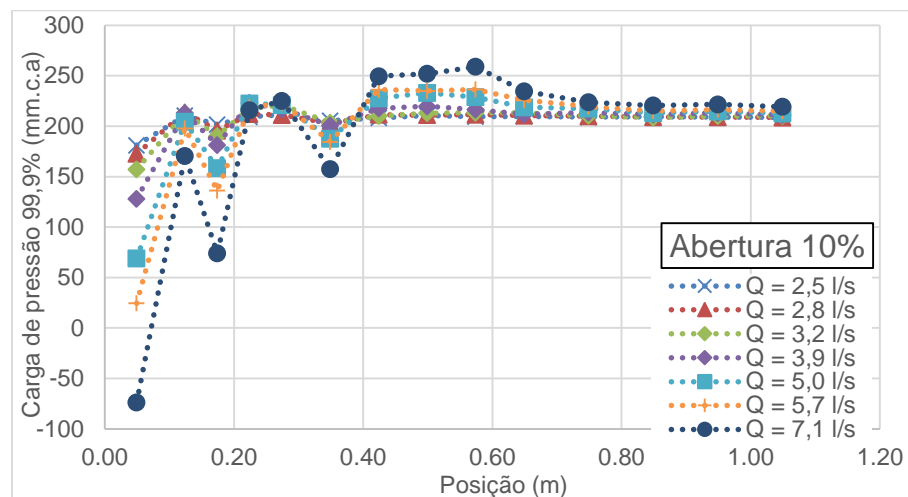


Figura 182- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 10%

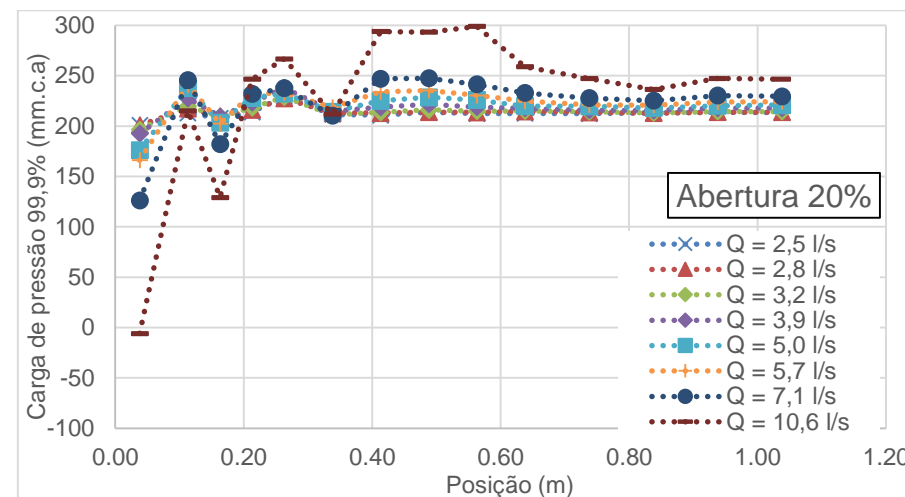


Figura 184- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 20%

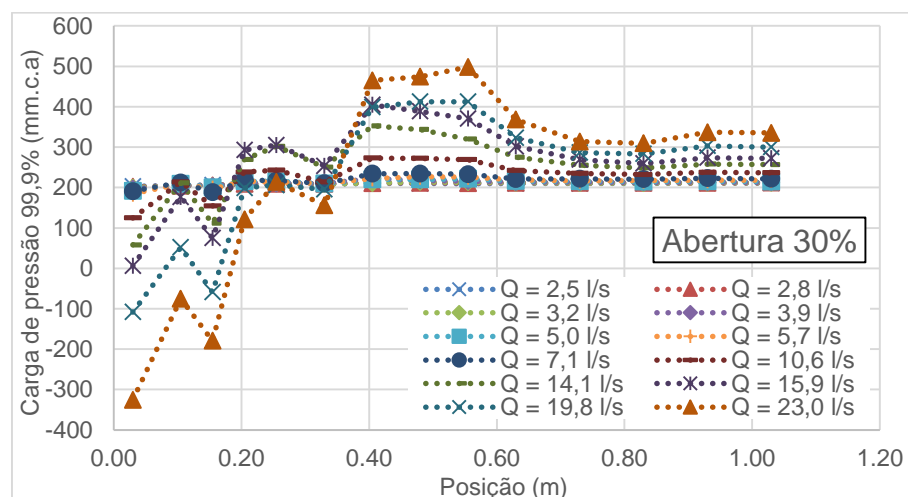


Figura 183- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 30%

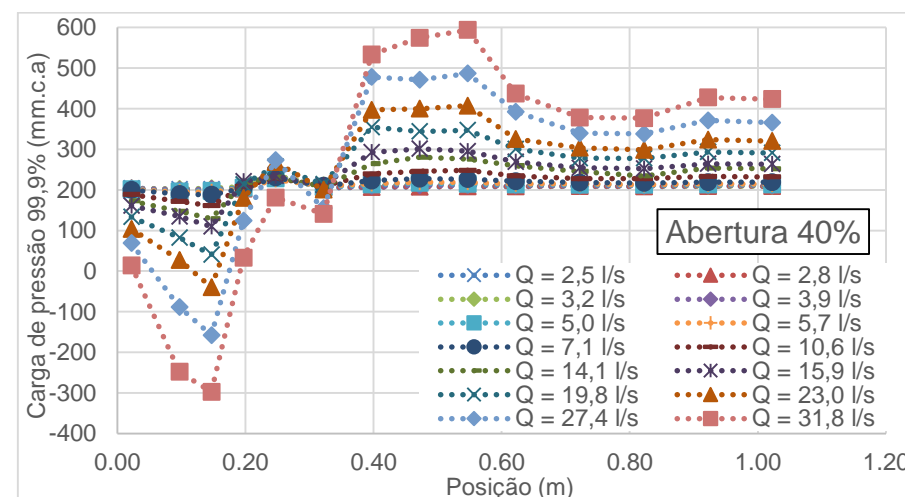


Figura 185- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 40%

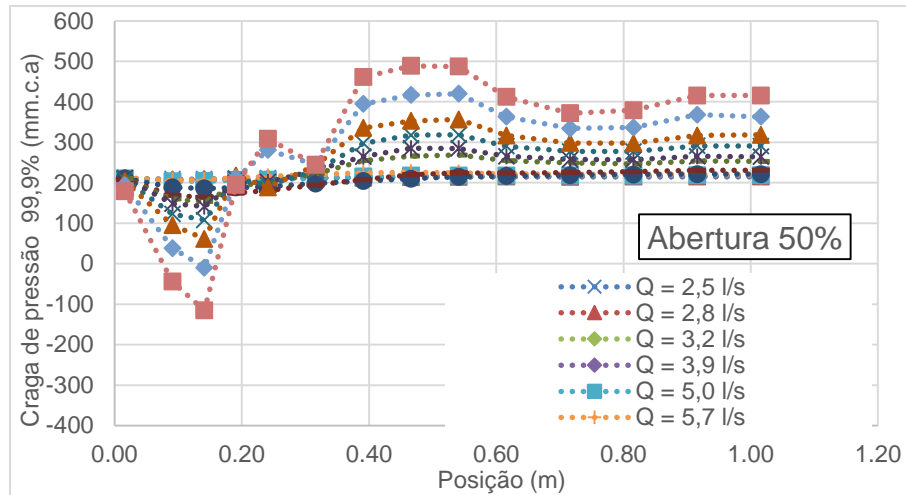


Figura 186- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 50%

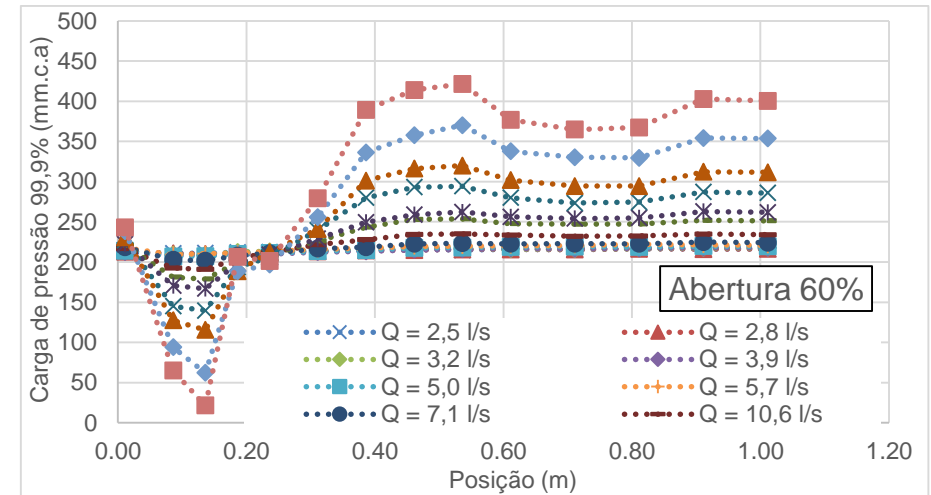


Figura 188- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 60%

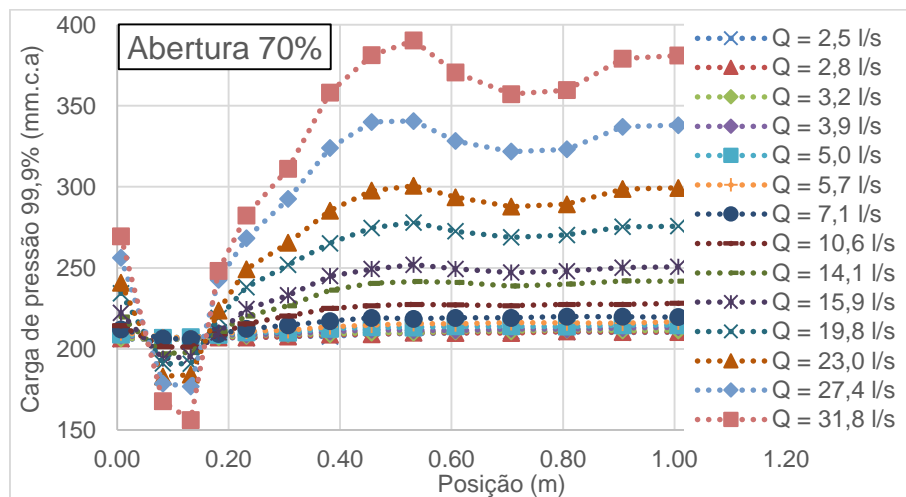


Figura 187- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 70%

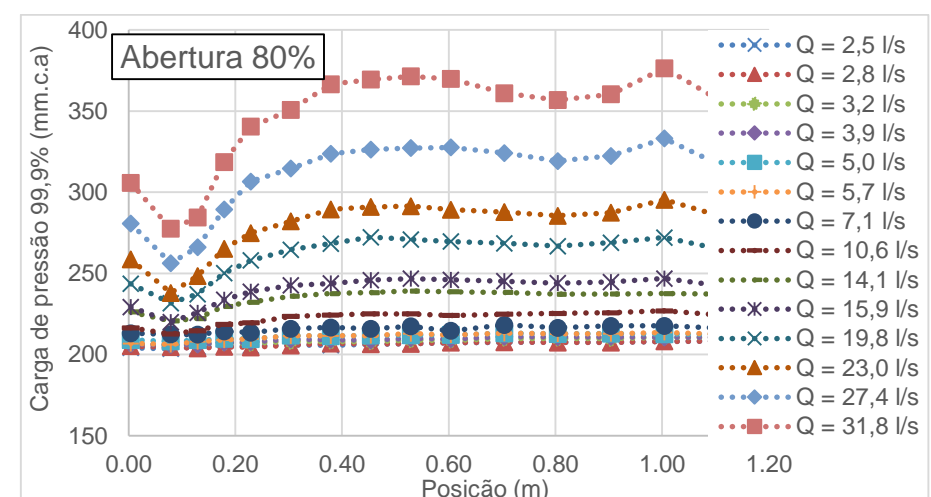


Figura 189- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 80%

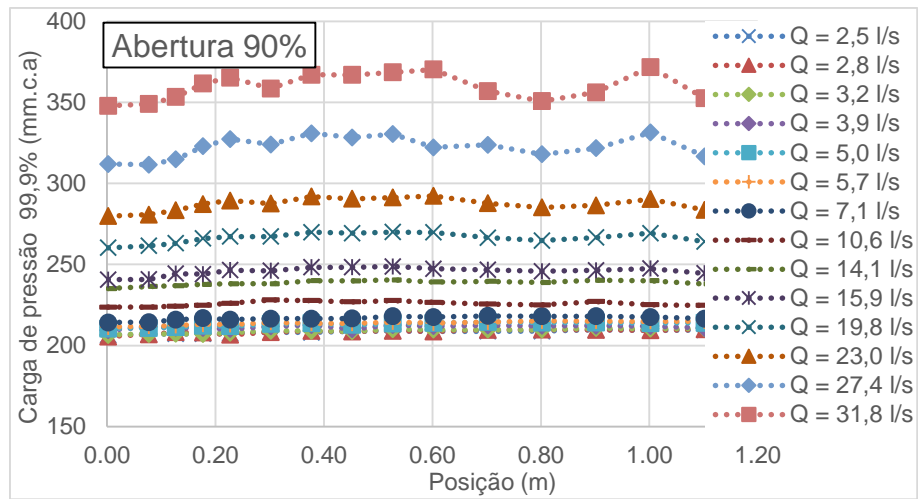


Figura 190- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, abertura de 90%

Apêndice L - Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base por vazão

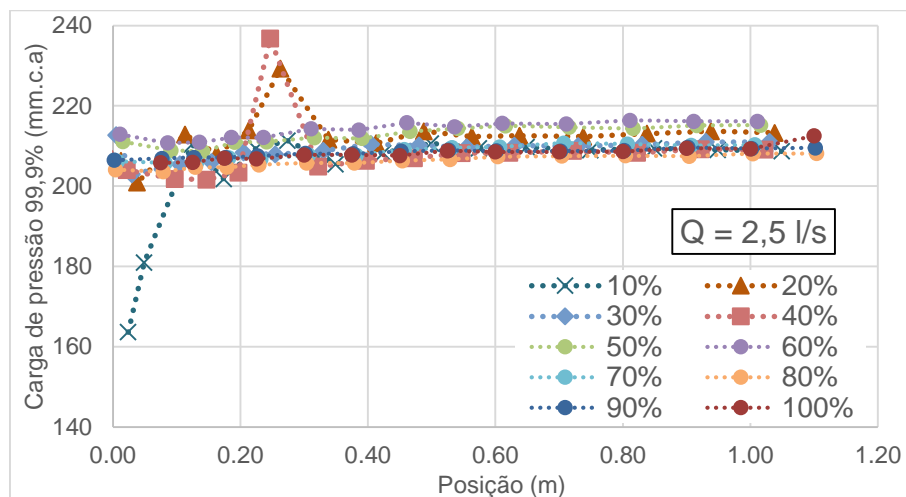


Figura 191- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,5 l/s

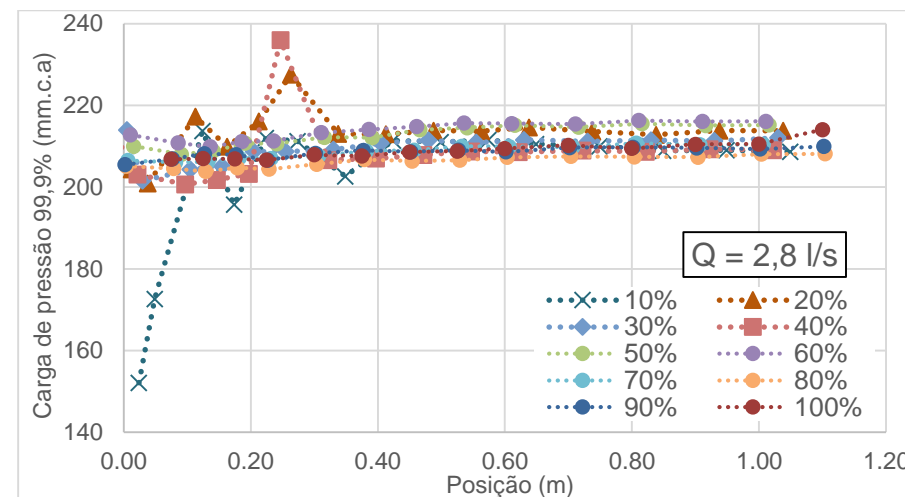


Figura 193- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 2,8 l/s

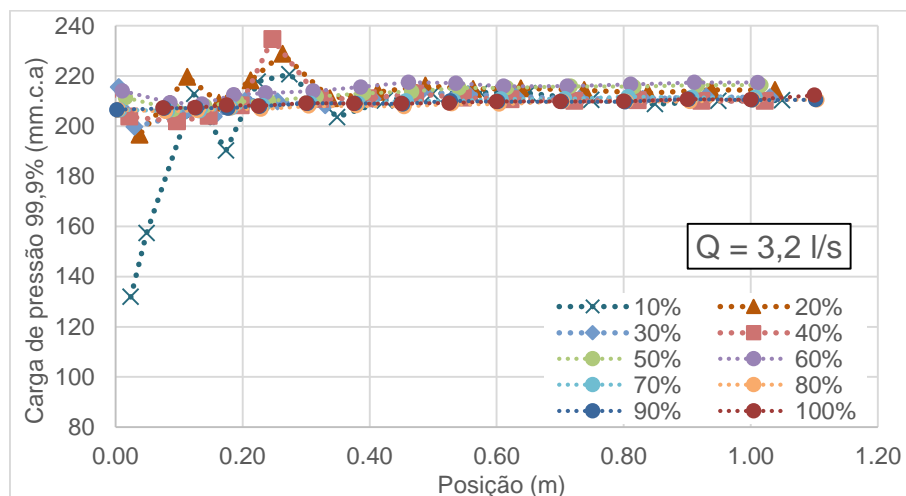


Figura 192- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,2 l/s

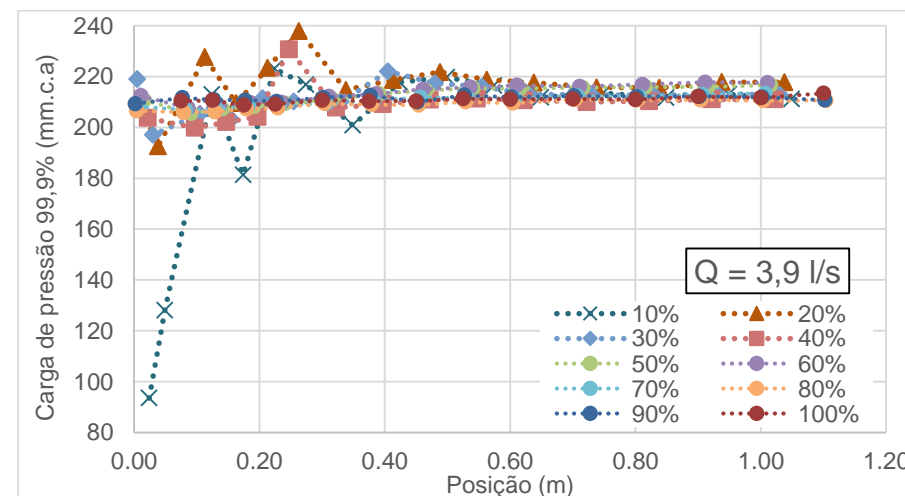


Figura 194- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 3,9 l/s

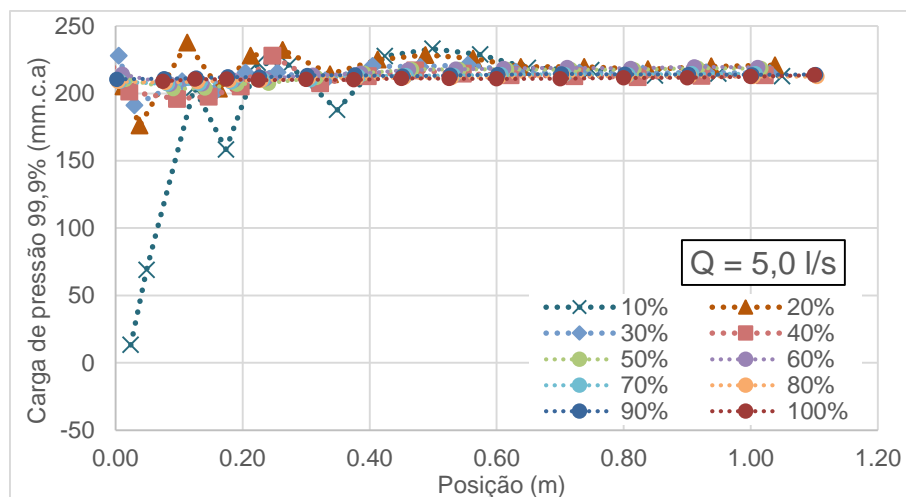


Figura 195- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,0 l/s

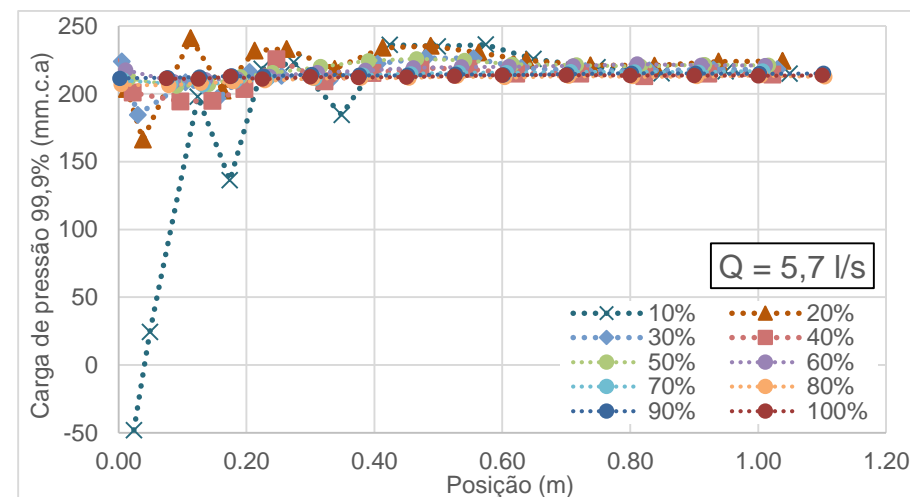


Figura 197- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 5,7 l/s

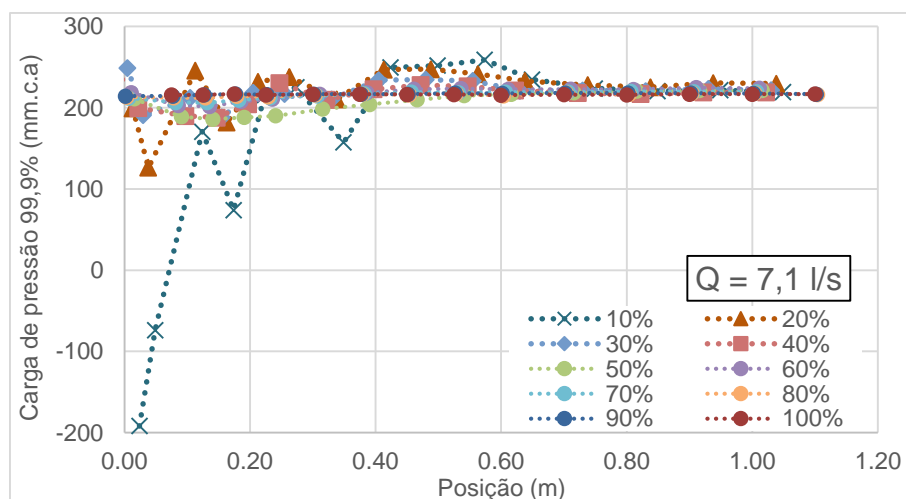


Figura 196- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 7,1 l/s

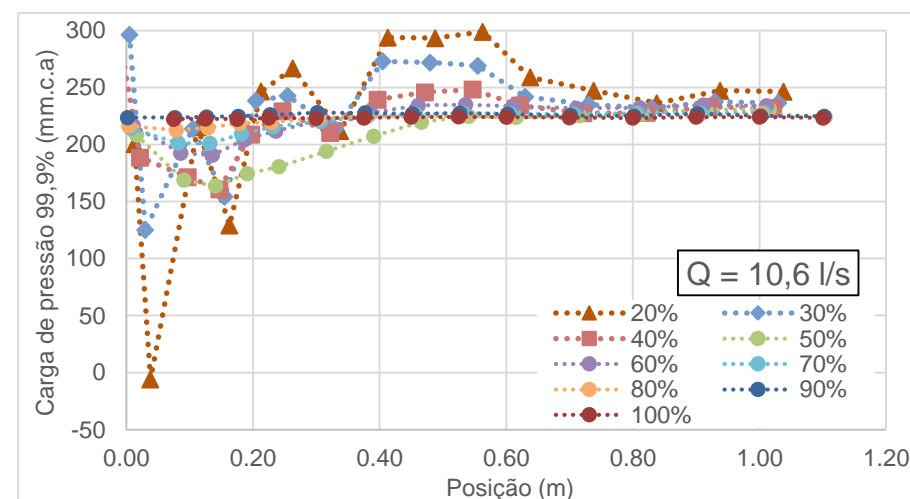


Figura 198- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 10,6 l/s

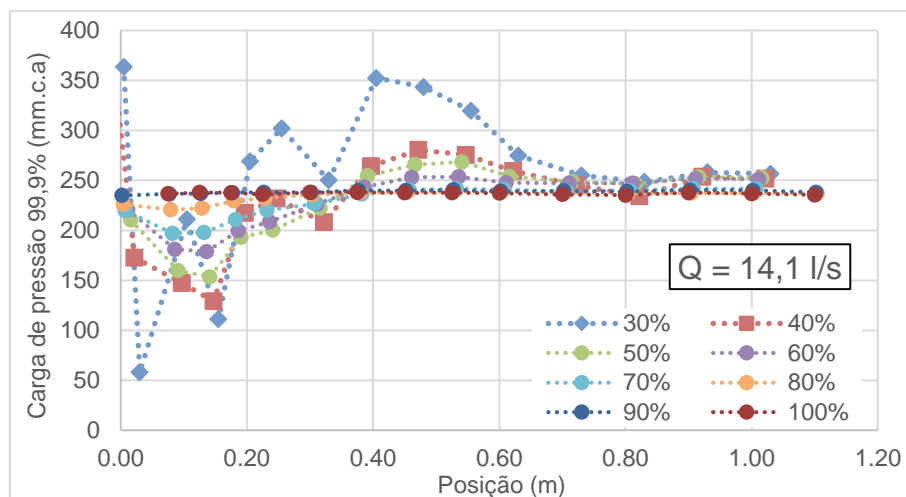


Figura 199- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 14,1 l/s

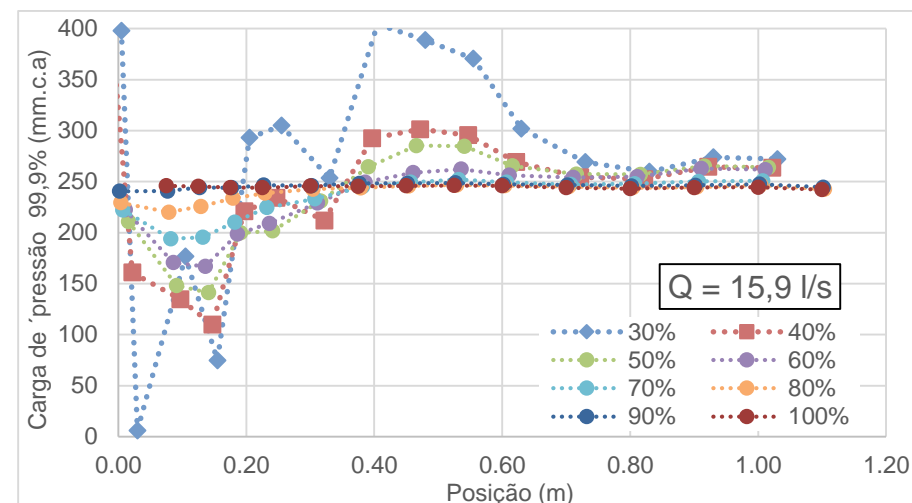


Figura 201- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 15,9 l/s

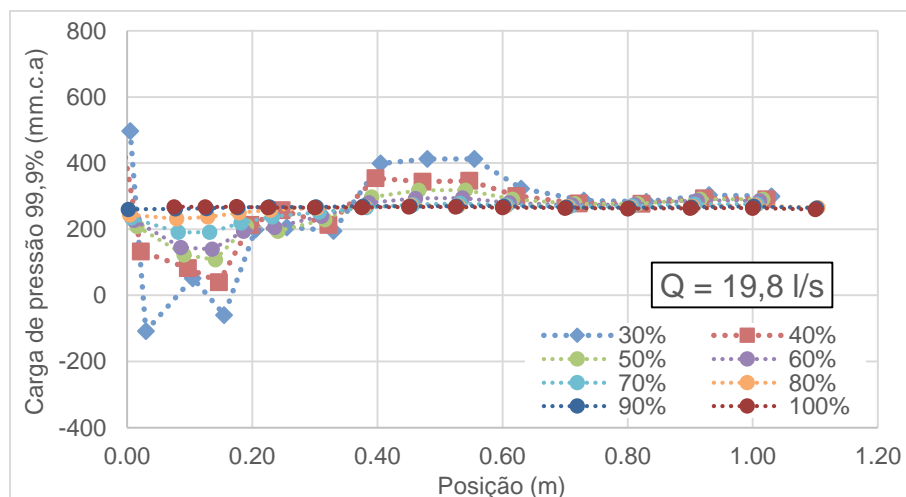


Figura 200- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 19,8 l/s

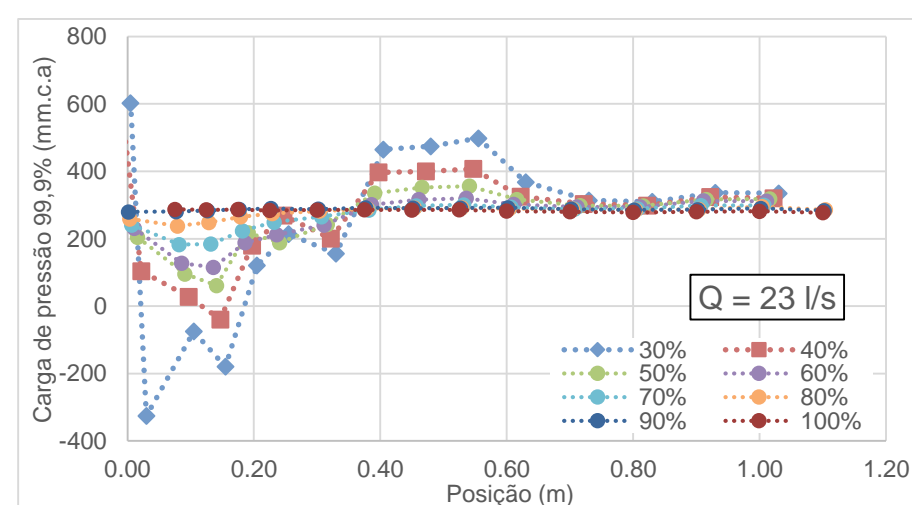


Figura 202- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 23 l/s

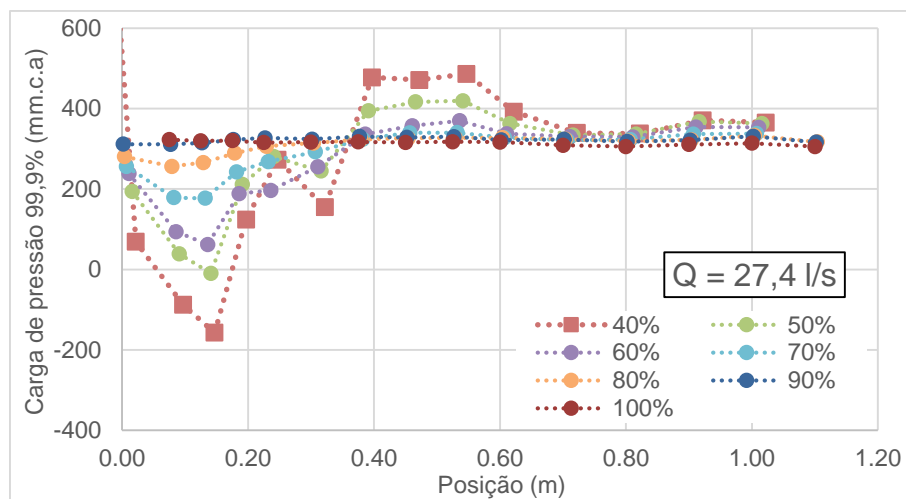


Figura 203- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 27,4 l/s

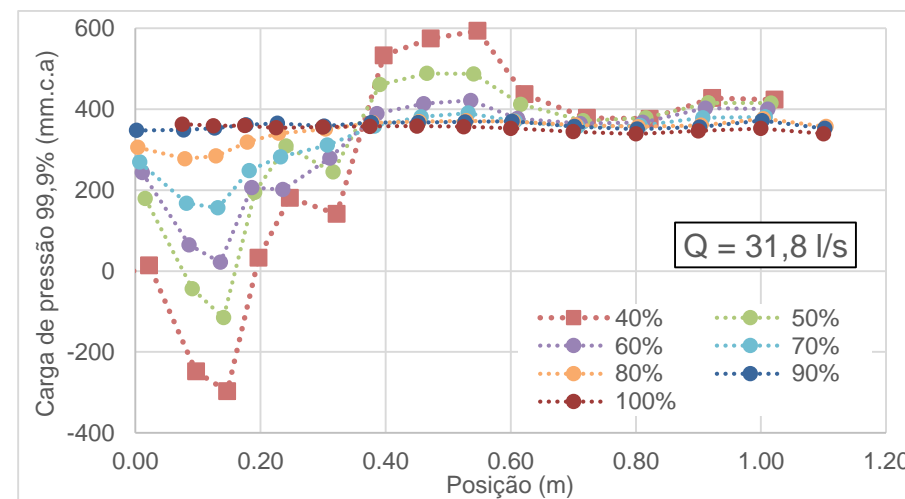


Figura 204- Comportamento das pressões 99,9% de probabilidade de não-excedência na base, vazão de 31,8 l/s

Apêndice M – Adimensional de pressão média

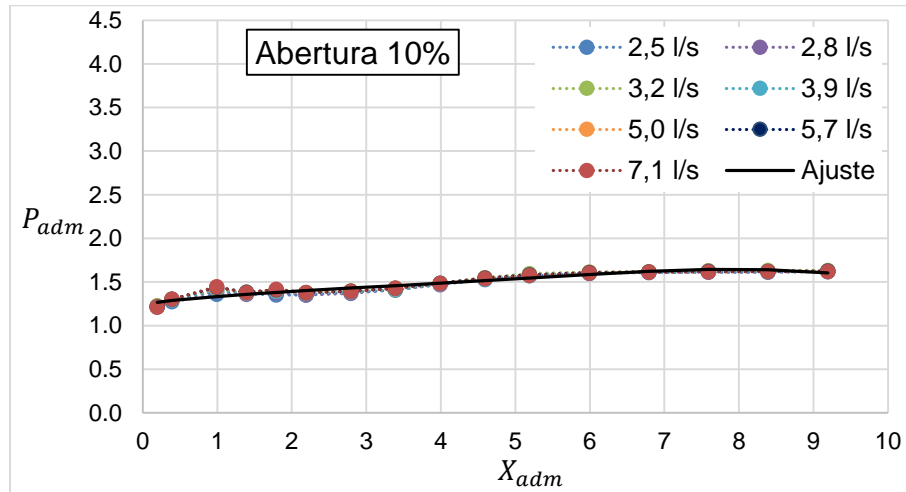


Figura 205 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 10%

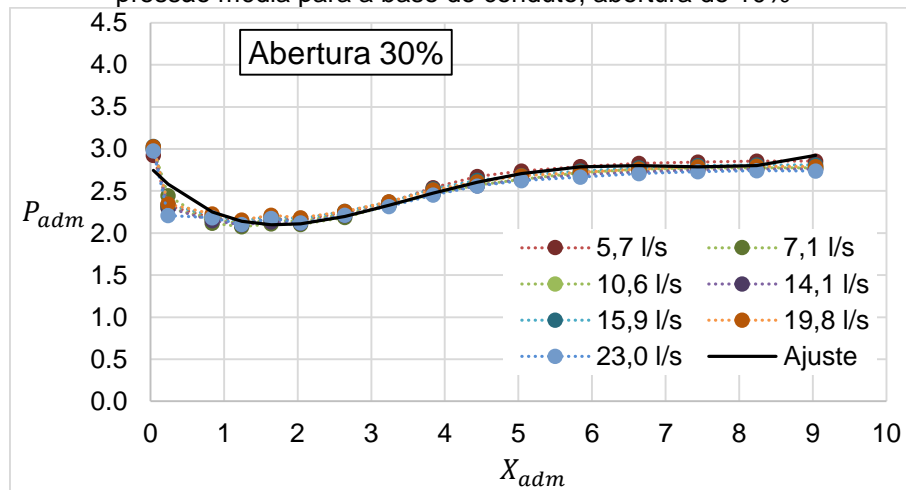


Figura 206 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 30%

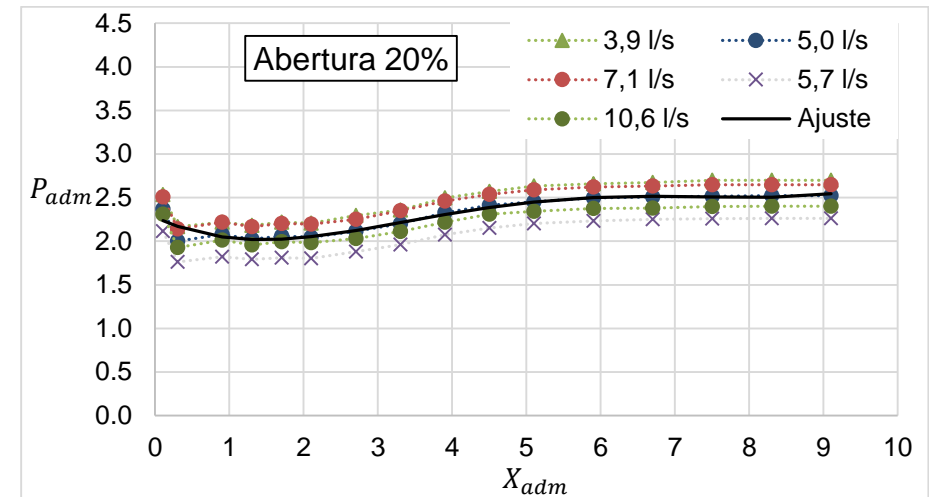


Figura 207 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 20%

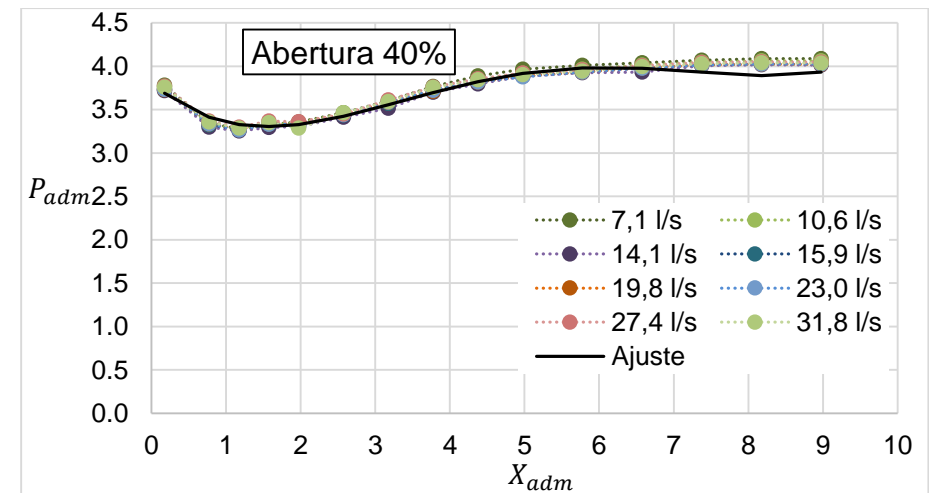


Figura 208 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 40%

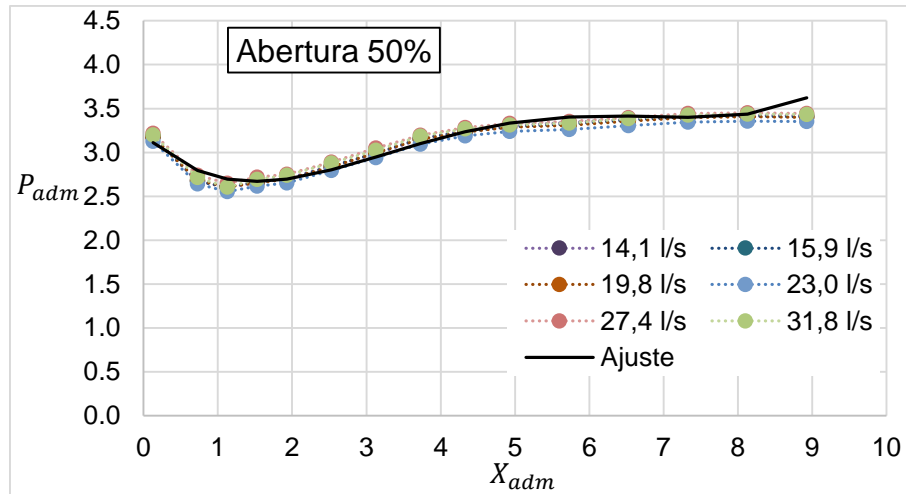


Figura 209 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 50%

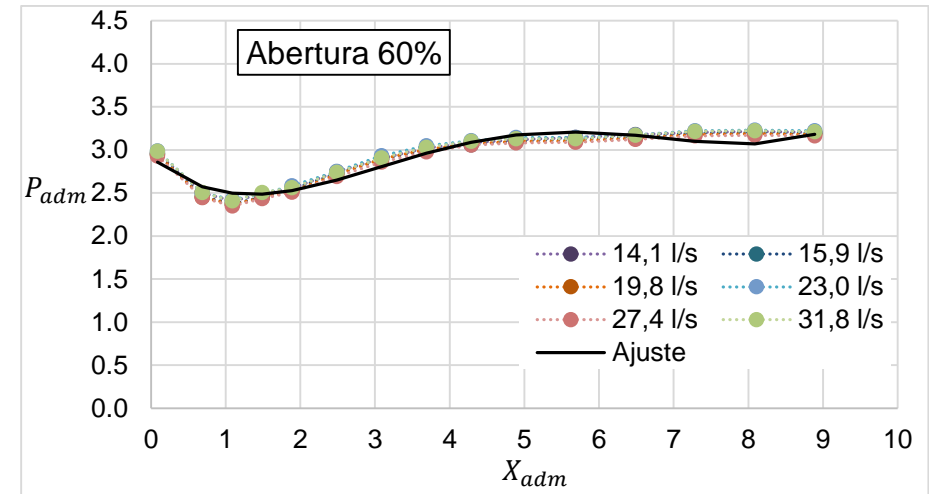


Figura 211 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 60%

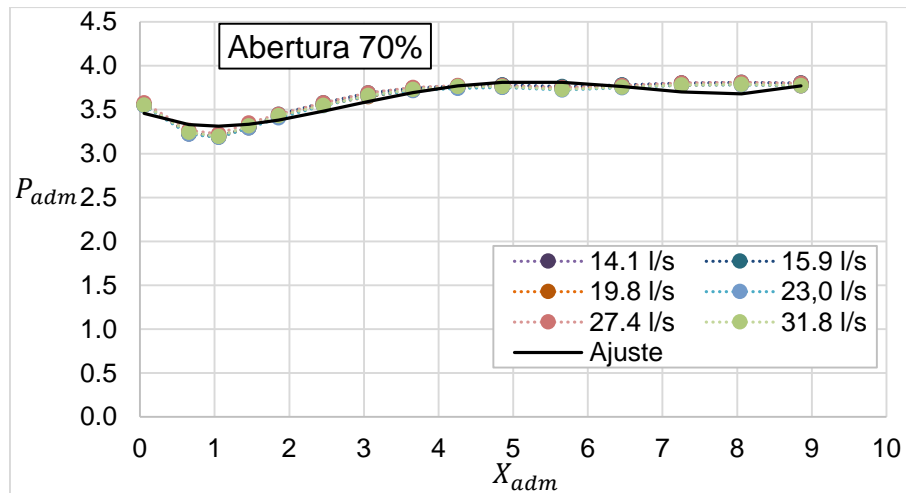


Figura 210 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 70%

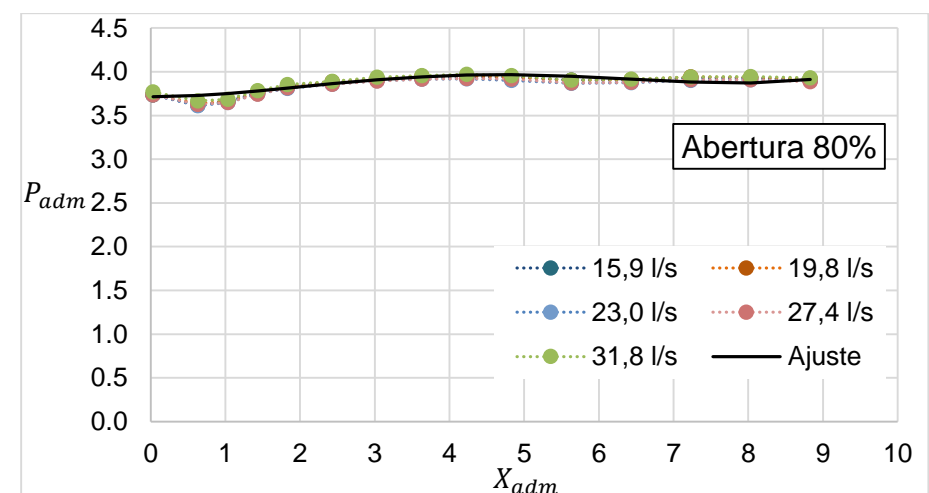


Figura 212 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 80%

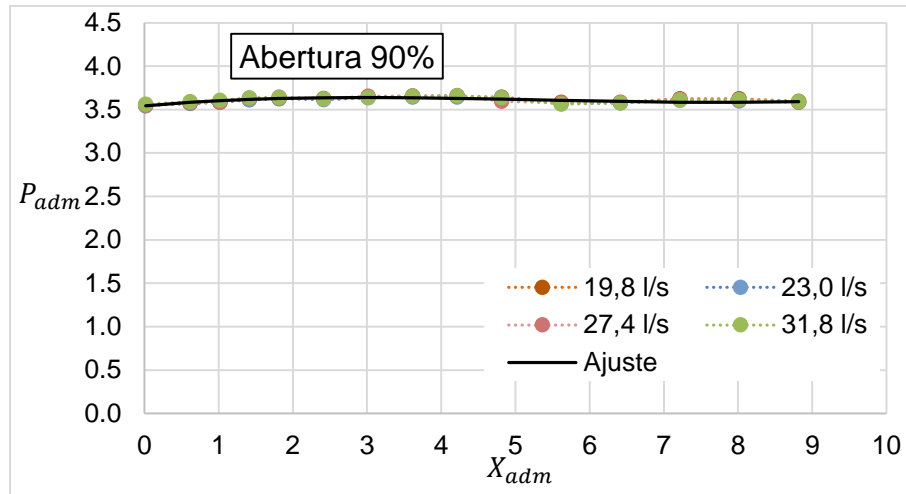


Figura 213 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para a base do conduto, abertura de 90%

Apêndice N – Adimensional de pressão flutuante

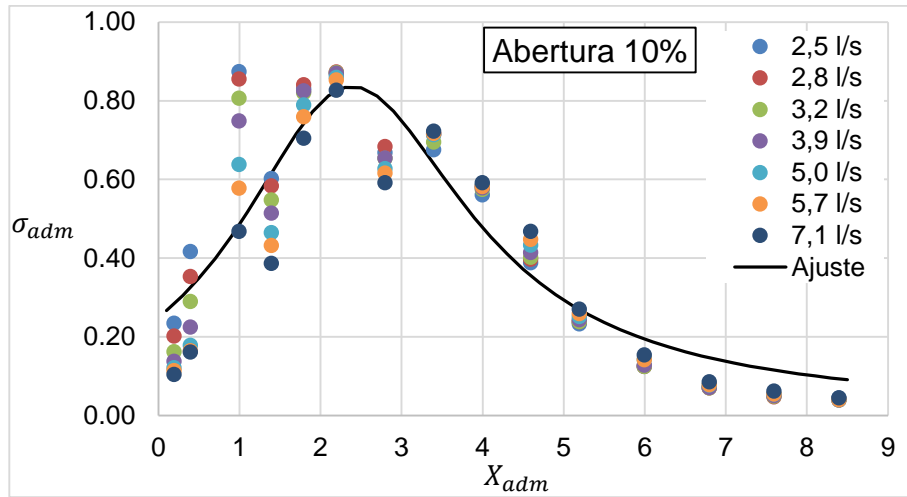


Figura 214 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 10%

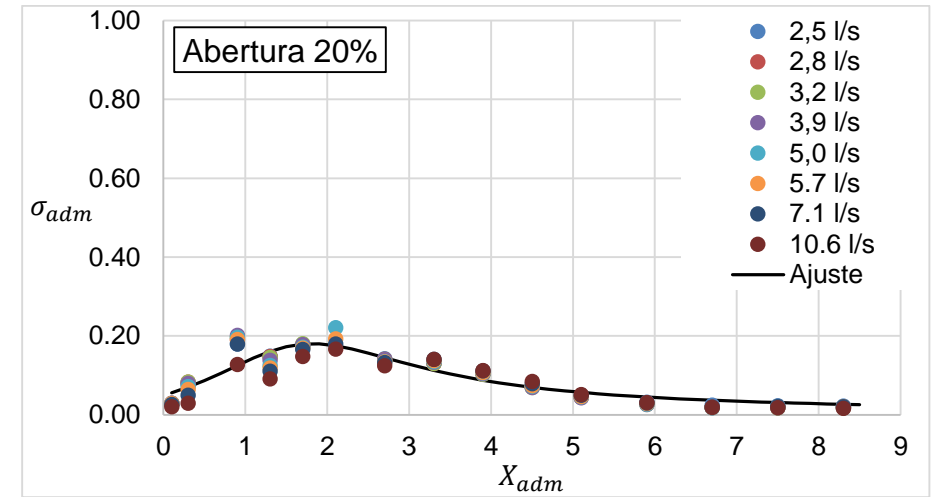


Figura 216 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 20%

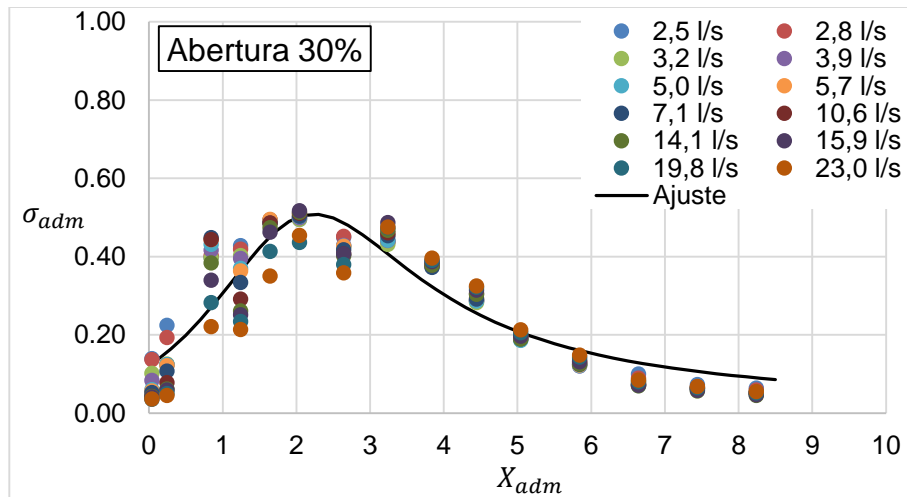


Figura 215 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 30%

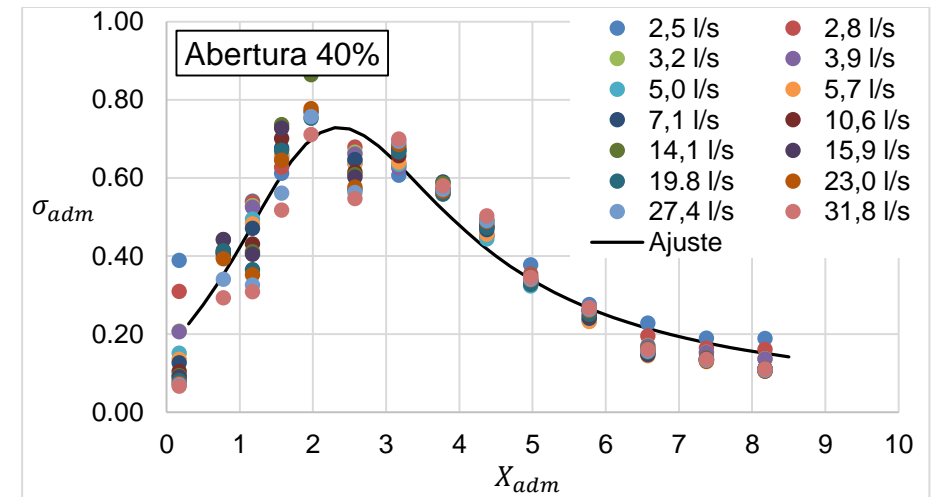


Figura 217 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 40%

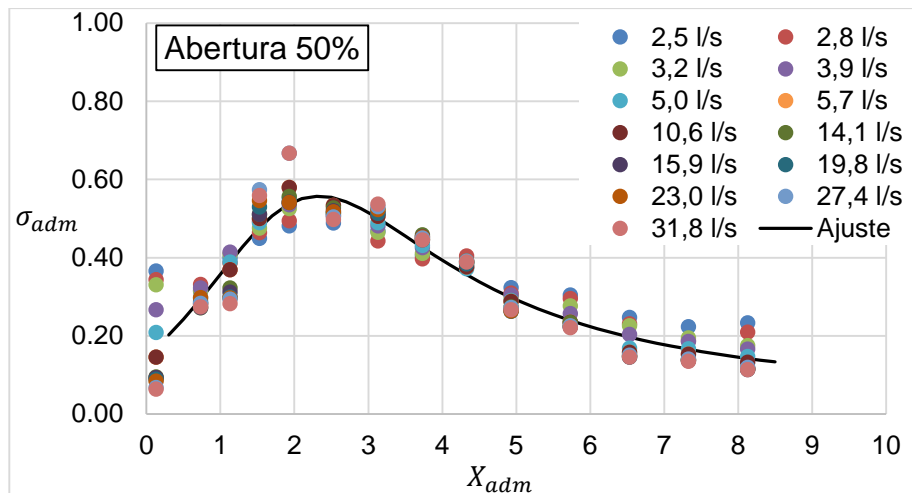


Figura 218 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 50%

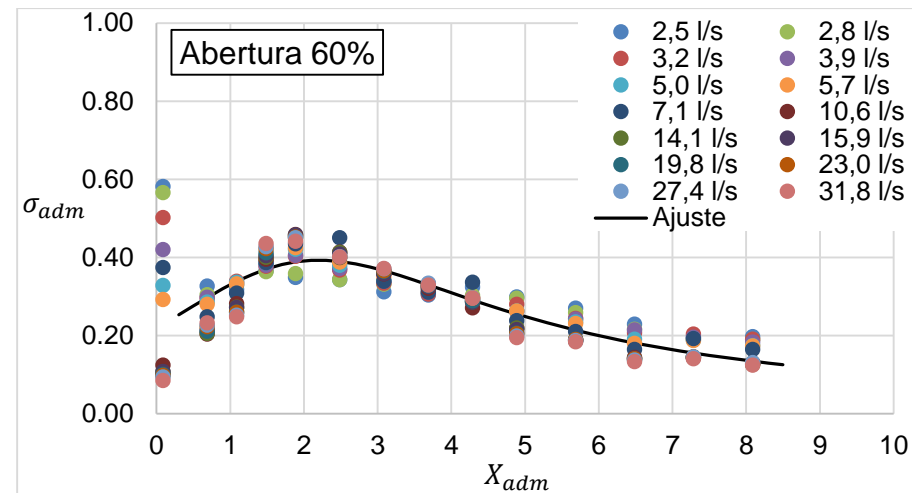


Figura 220 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 60%

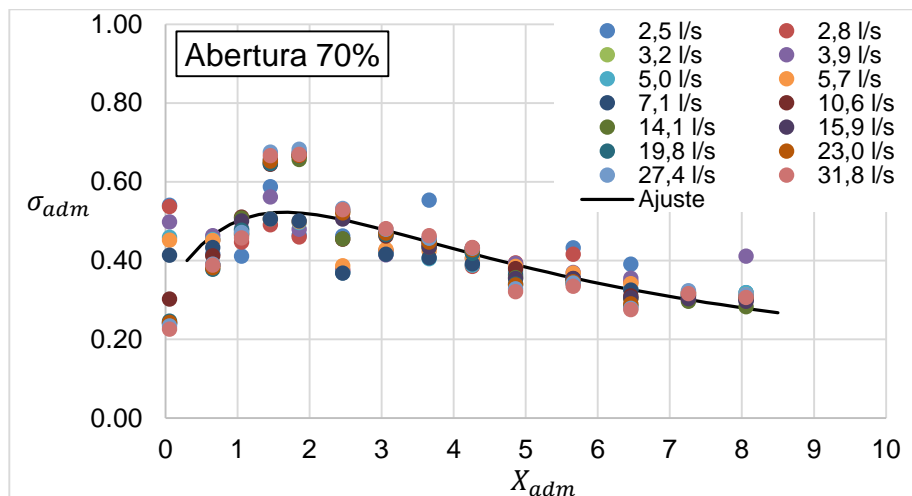


Figura 219 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 70%

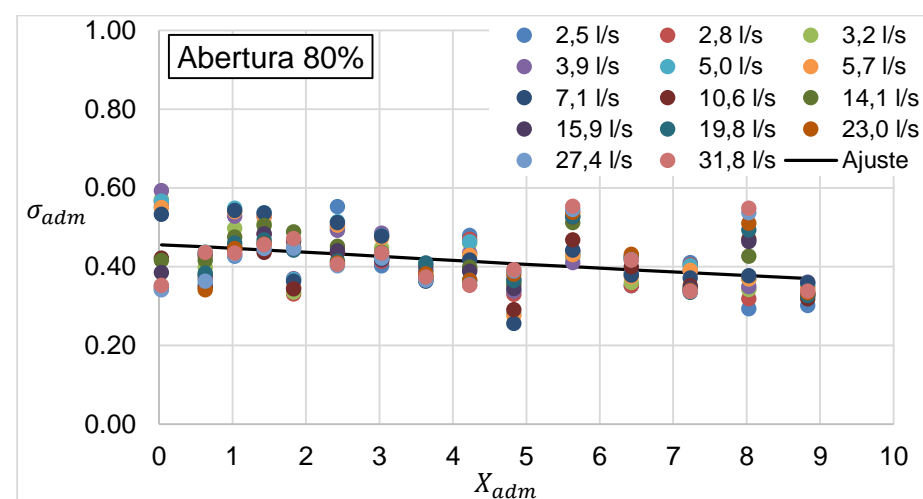


Figura 221 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 80%

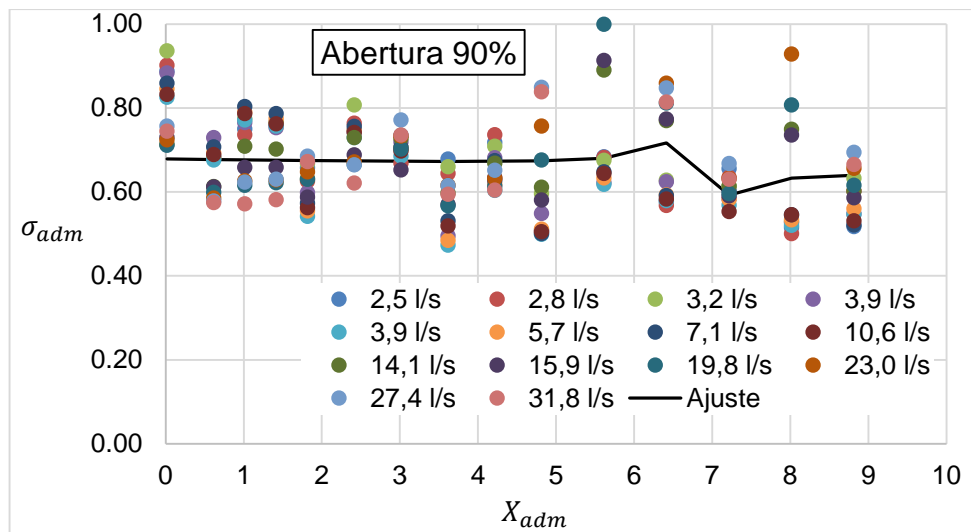


Figura 222 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para a base do conduto, abertura de 90%

Apêndice O – Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N0,1%

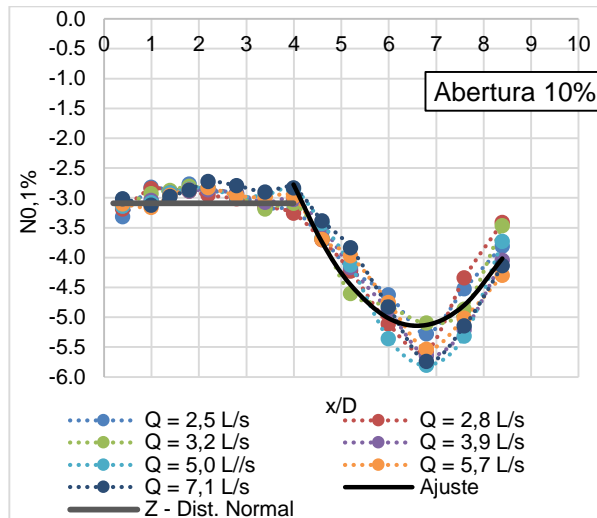


Figura 223 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 10%

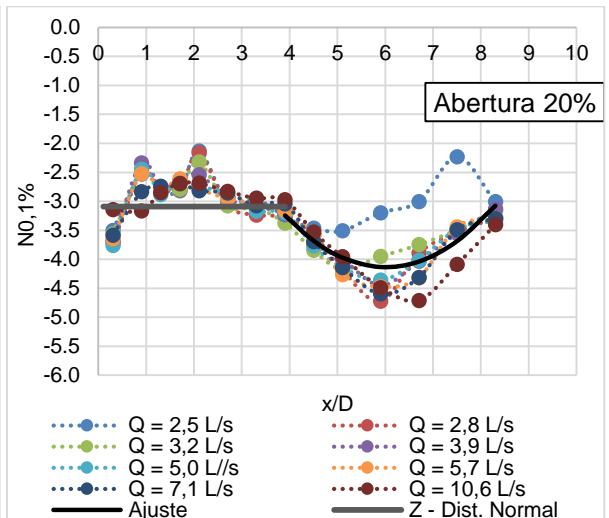


Figura 224 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 20%

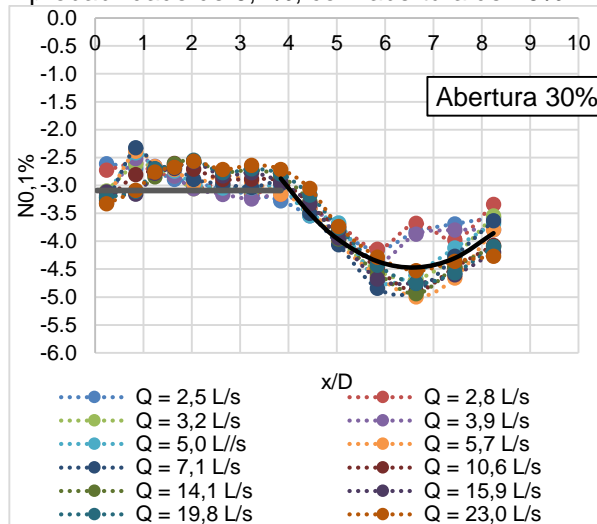


Figura 225 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 30%

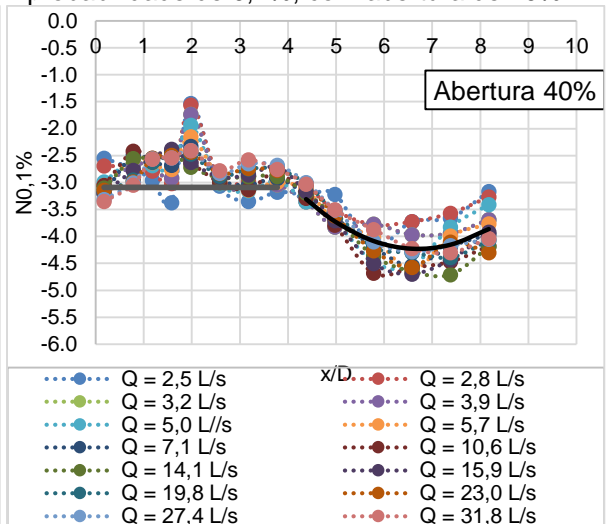


Figura 226 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 40%

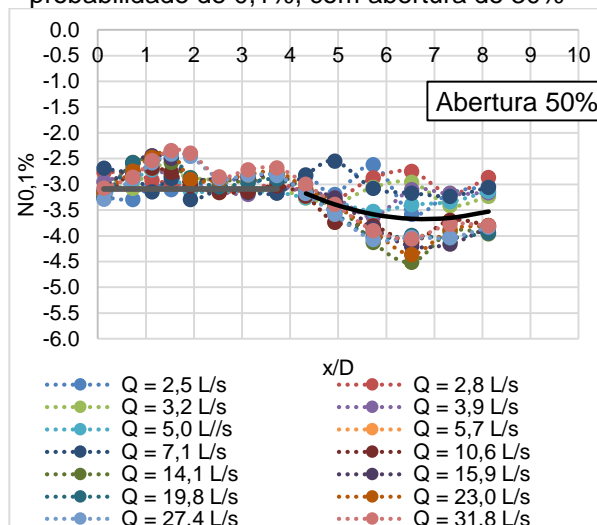


Figura 227 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 50%

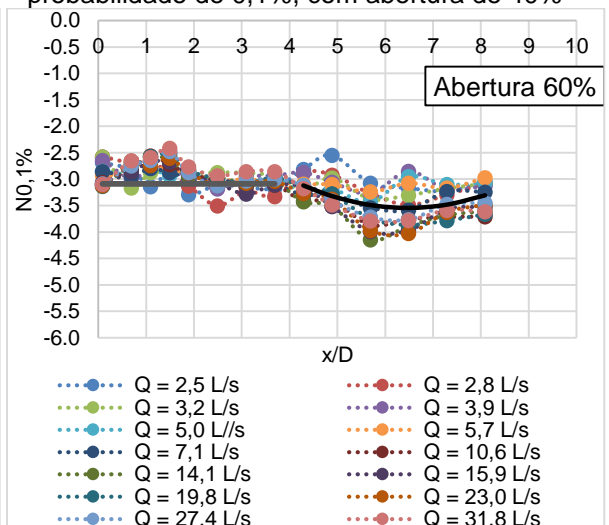


Figura 228 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 0,1%, com abertura de 60%

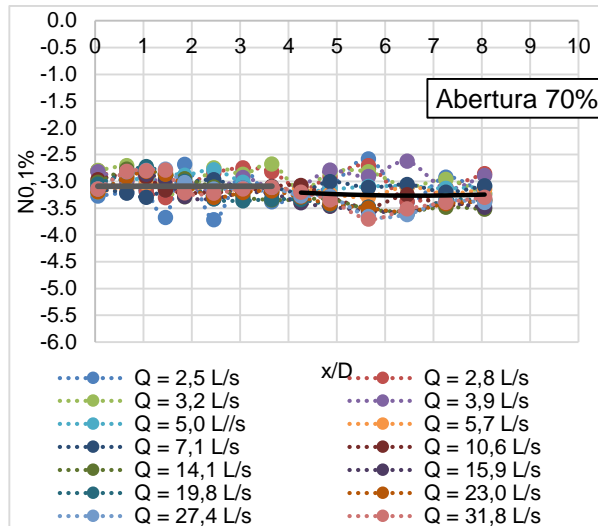


Figura 229 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 70%

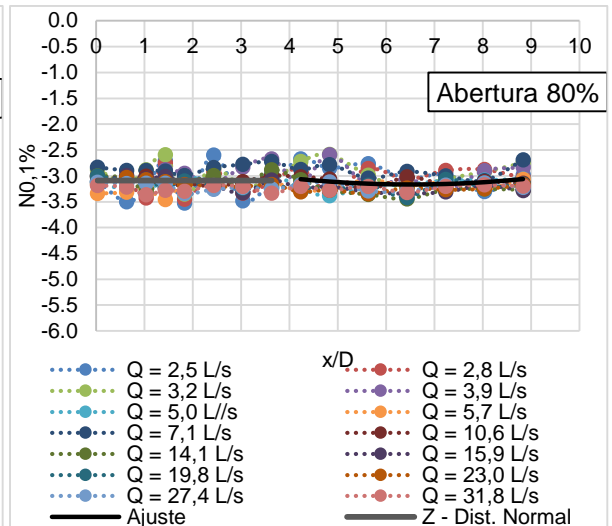


Figura 230 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 80%

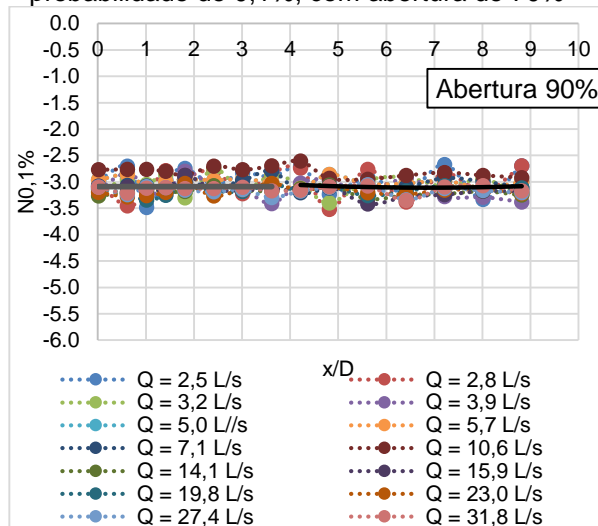


Figura 231 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, com abertura de 90%

Apêndice P - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N1,0%

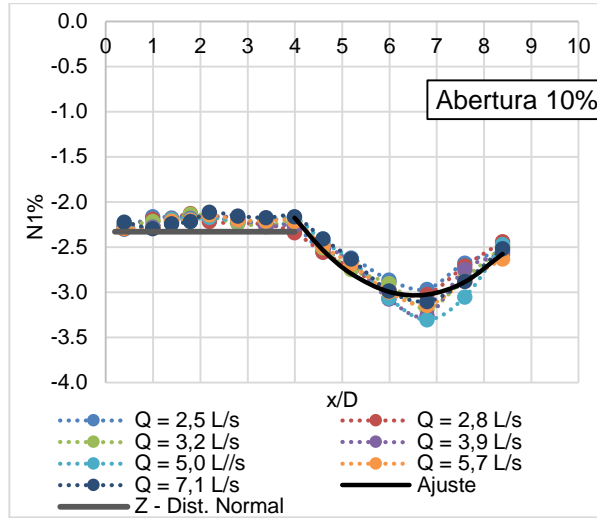


Figura 232 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 10%

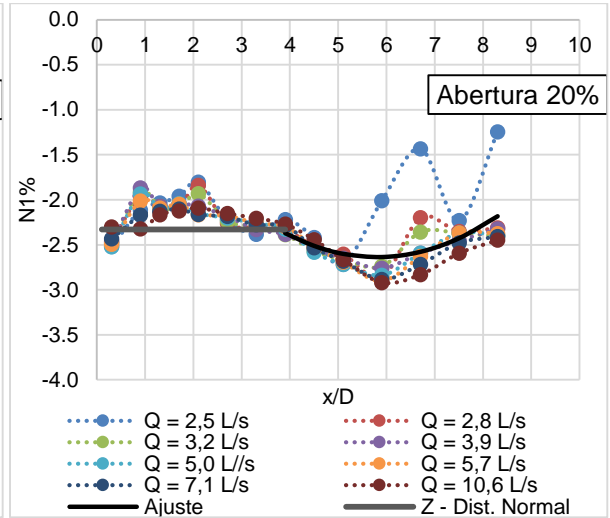


Figura 233 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 20%

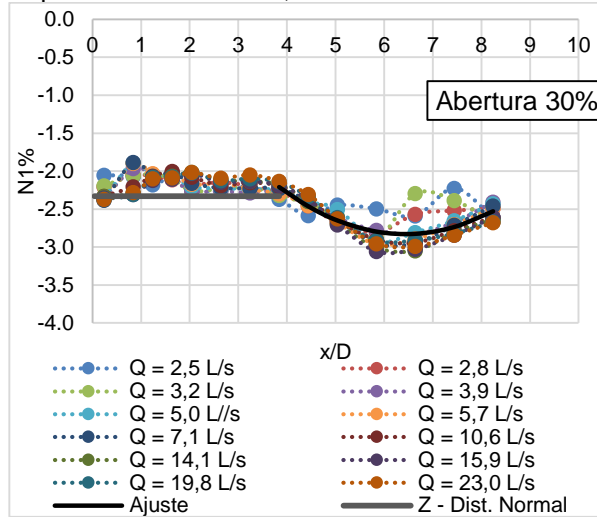


Figura 234 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 1%, com abertura de 30%

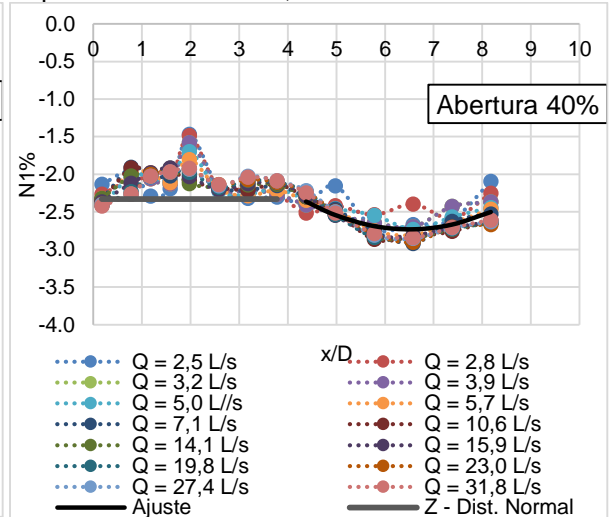


Figura 235 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 1%, com abertura de 40%

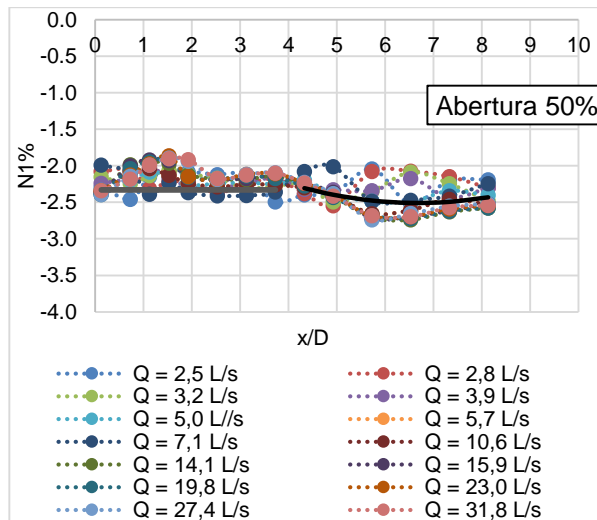


Figura 236 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 1%, com abertura de 50%

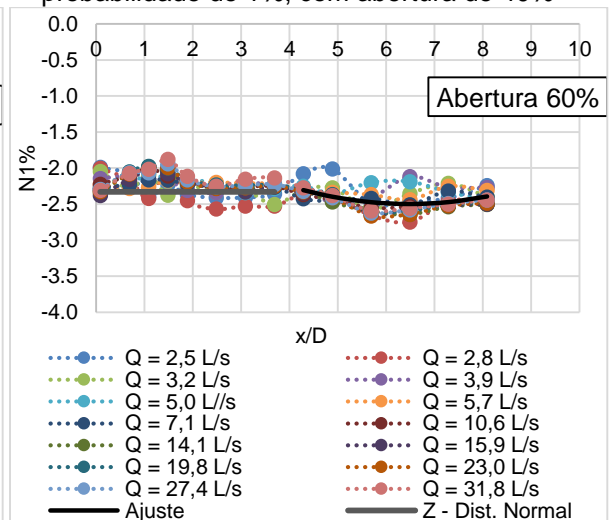


Figura 237 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 1%, com abertura de 60%

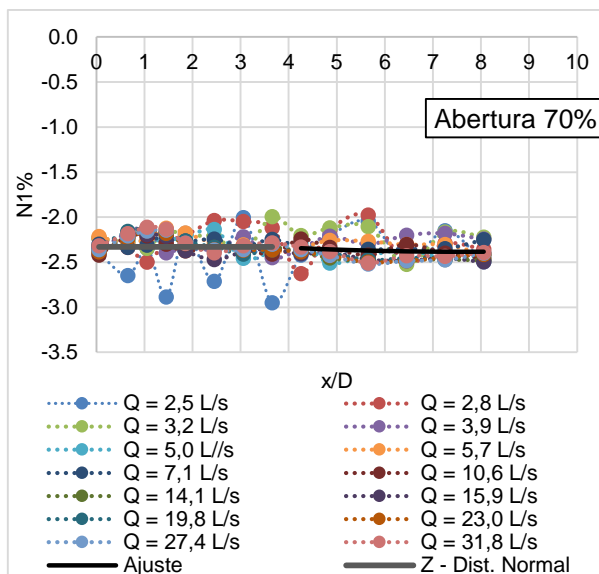


Figura 238 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 70%

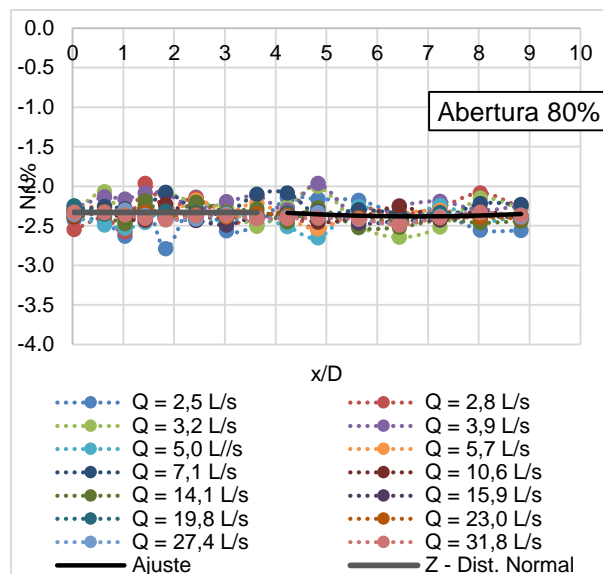


Figura 239 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 80%

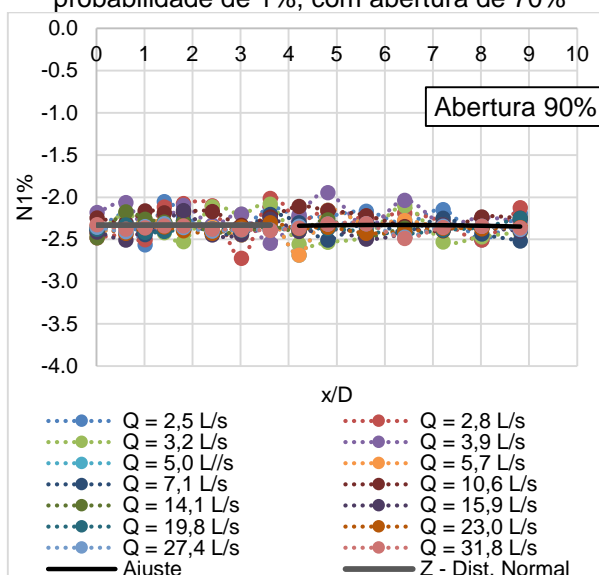


Figura 240 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1%, com abertura de 90%

Apêndice Q - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N99,0%

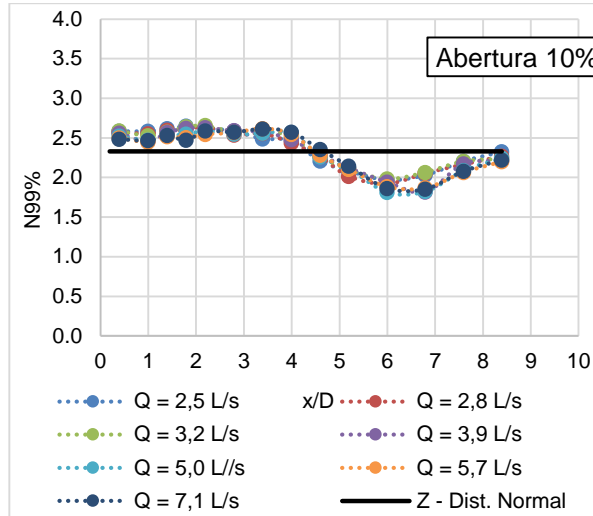


Figura 241 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 10%

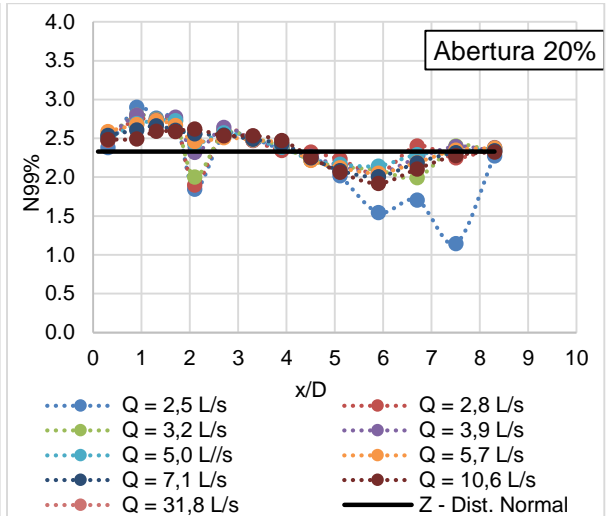


Figura 242 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 20%

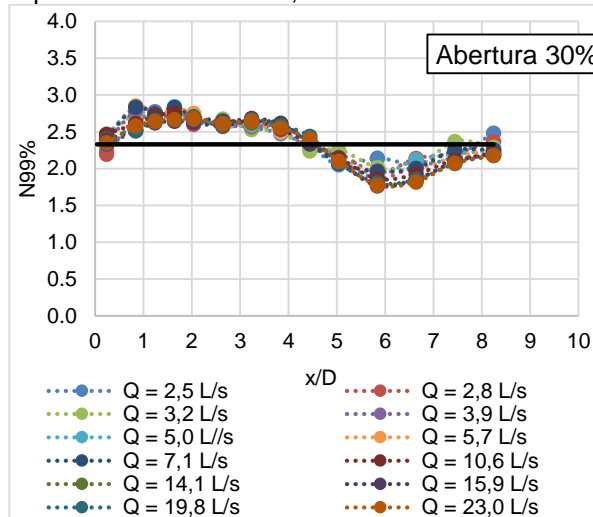


Figura 243 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 30%

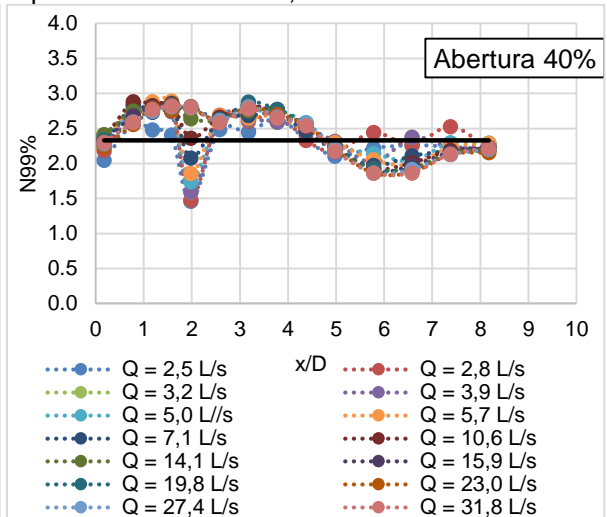


Figura 244 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 40%

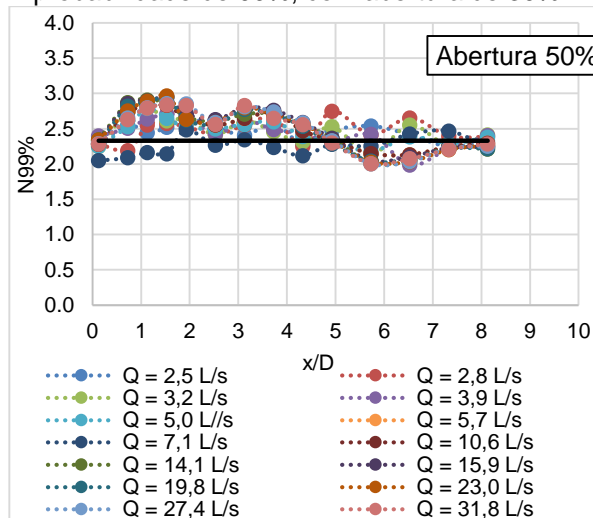


Figura 245 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 50%

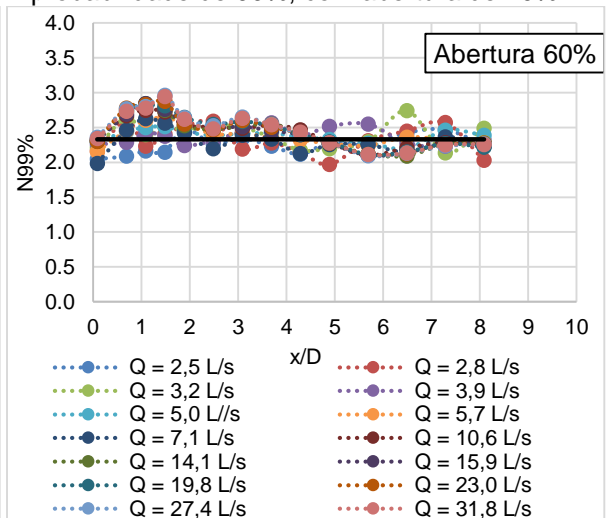


Figura 246 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99%, com abertura de 60%

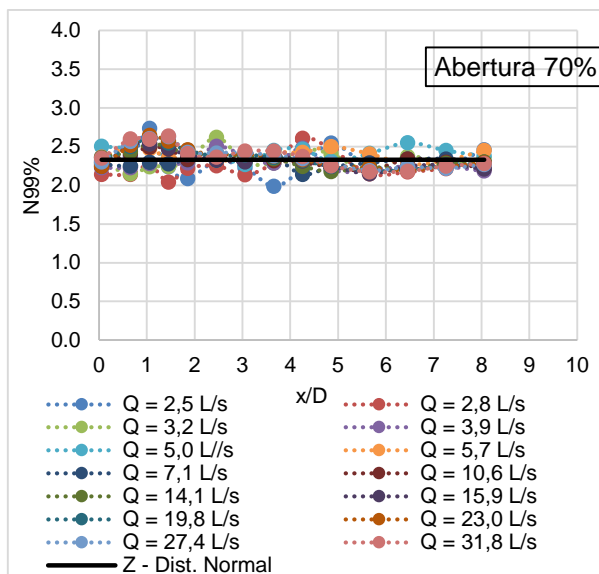


Figura 247 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 70%

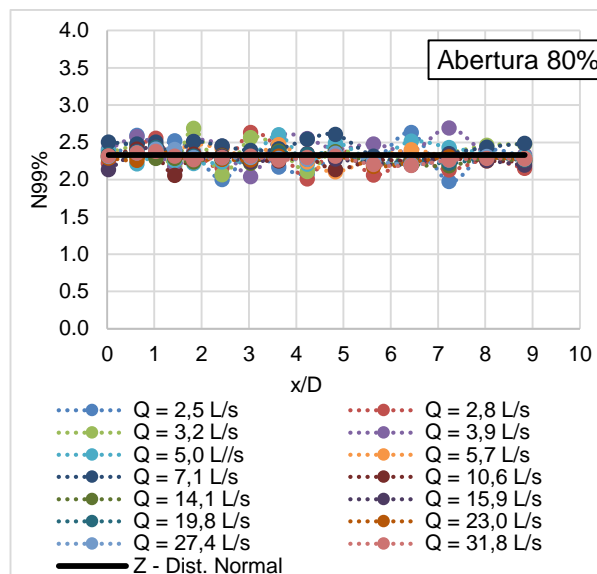


Figura 248 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 80%

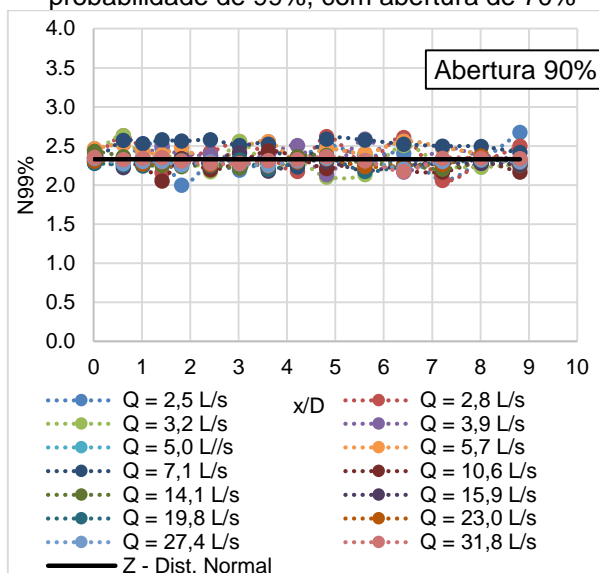


Figura 249 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99%, com abertura de 90%

Apêndice R - Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade N99,9%

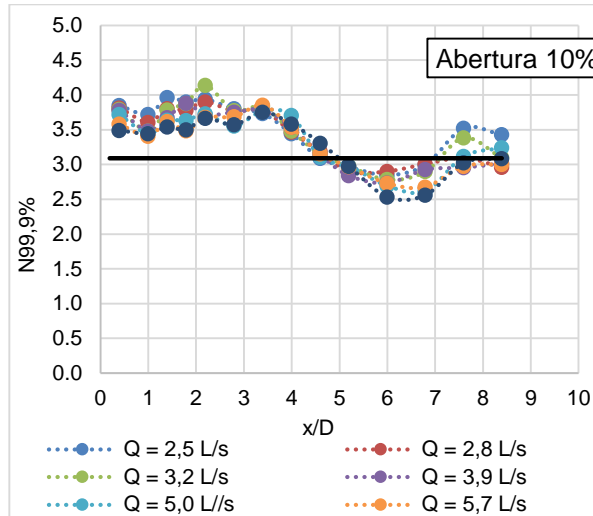


Figura 250 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 10%

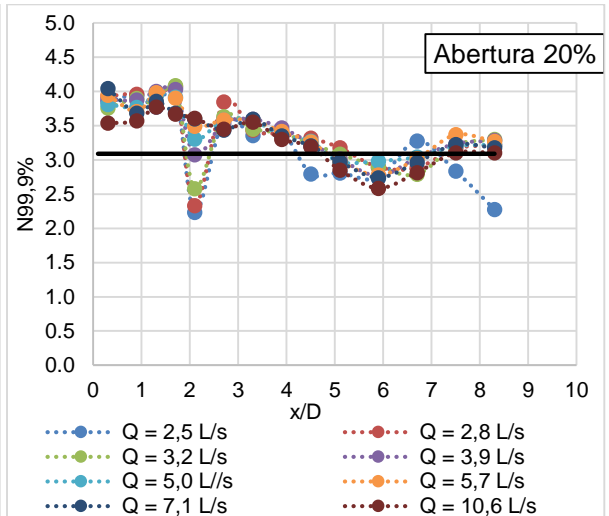


Figura 251 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 20%

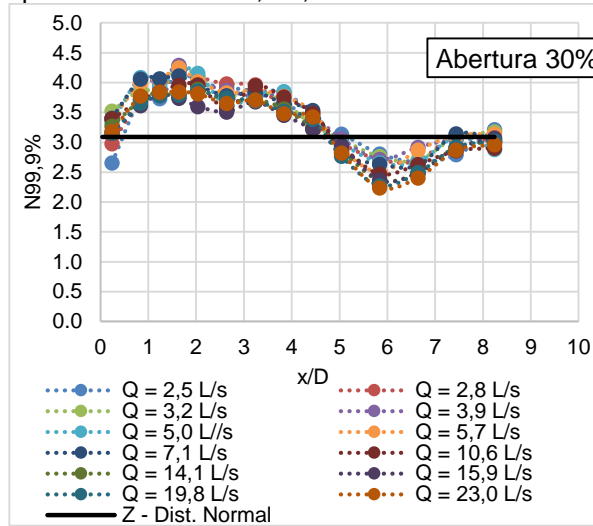


Figura 252 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 30%

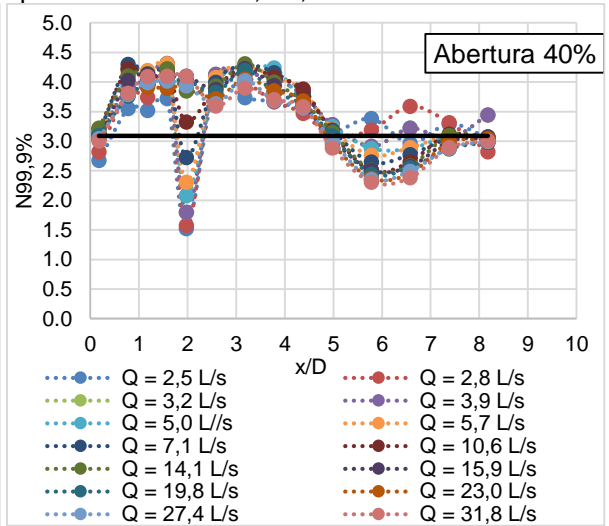


Figura 253 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 40%

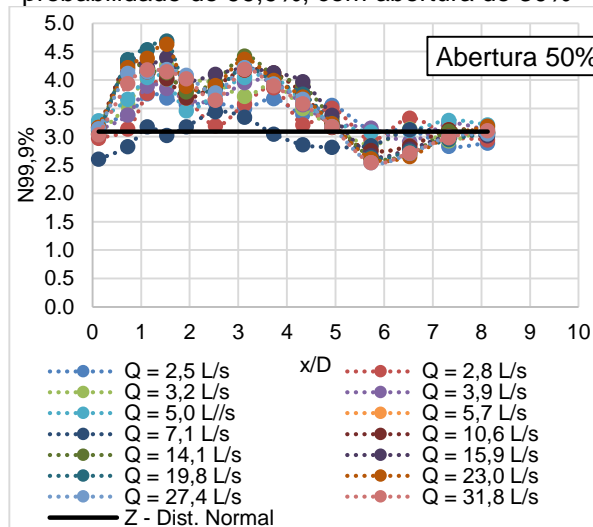


Figura 254 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 50%

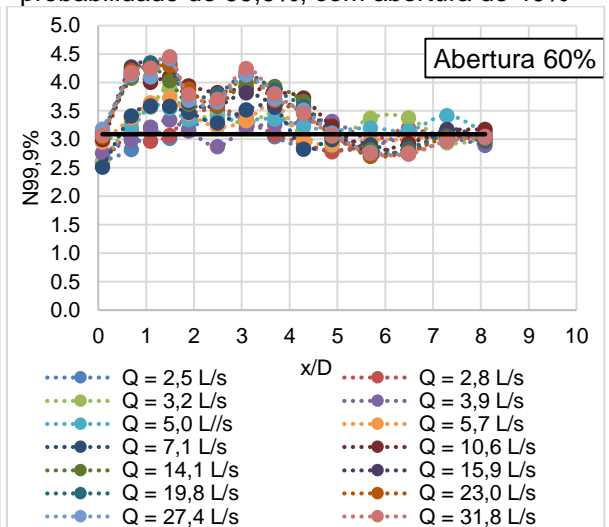


Figura 255 - Coeficiente estatístico com probabilidade de 99,9%, com abertura de 60%

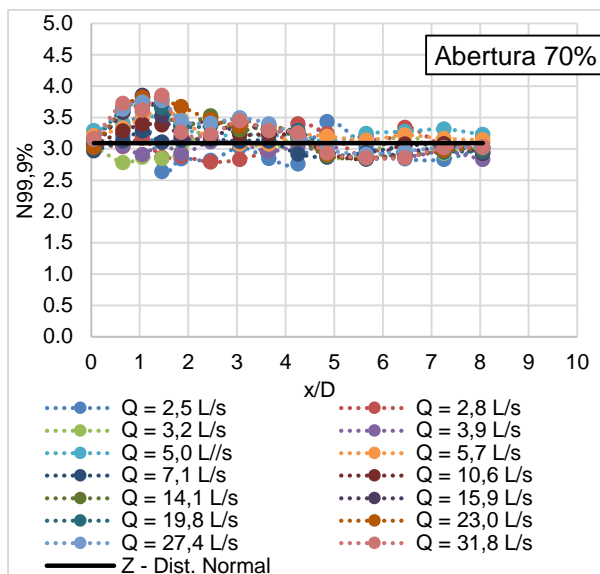


Figura 256 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 70%

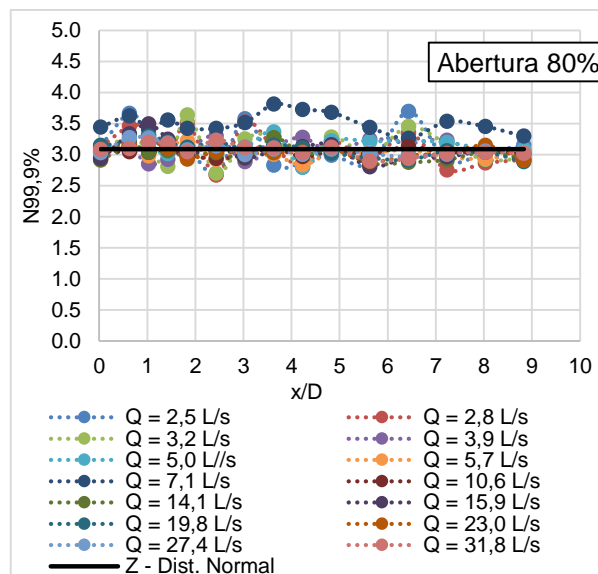


Figura 257 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 80%

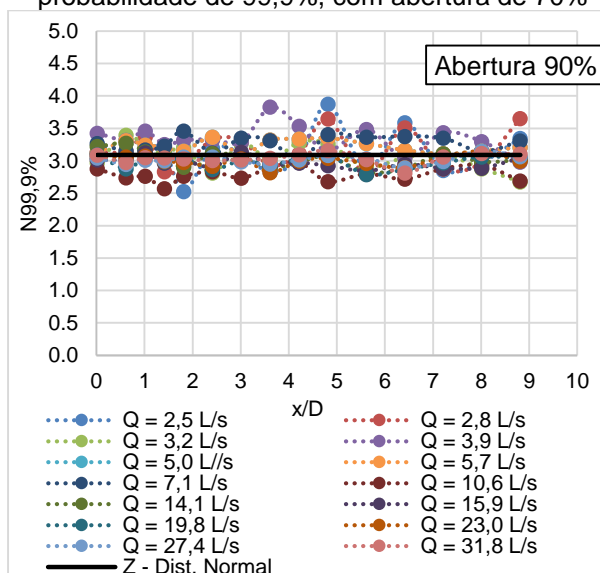


Figura 258 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 99,9%, com abertura de 90%

Apêndice S – Verificação dos adimensionais de pressão média

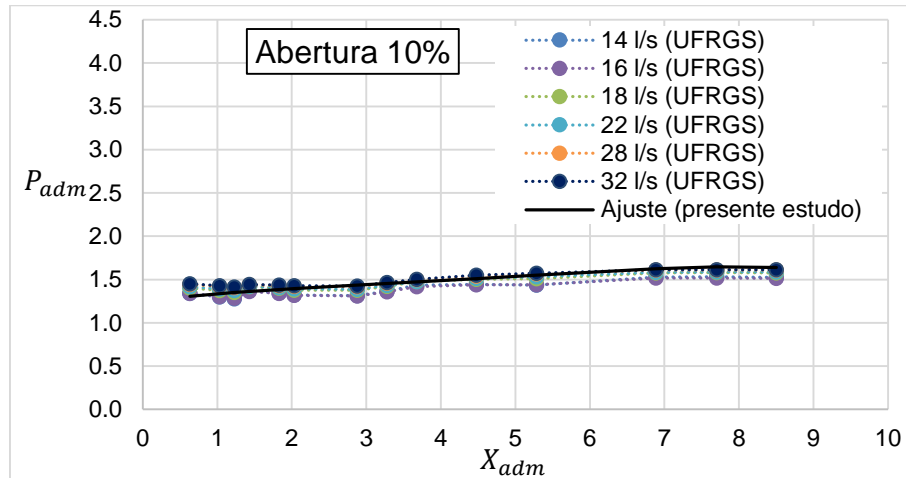


Figura 259 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10%

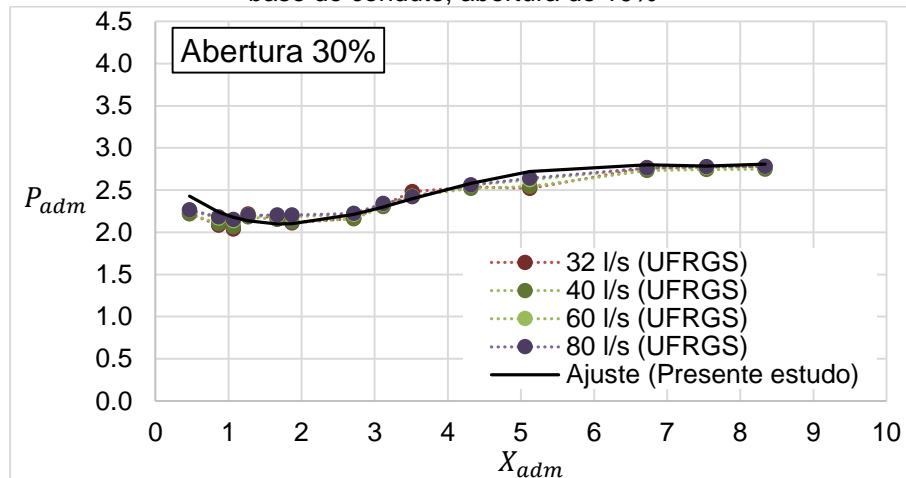


Figura 260 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 30%

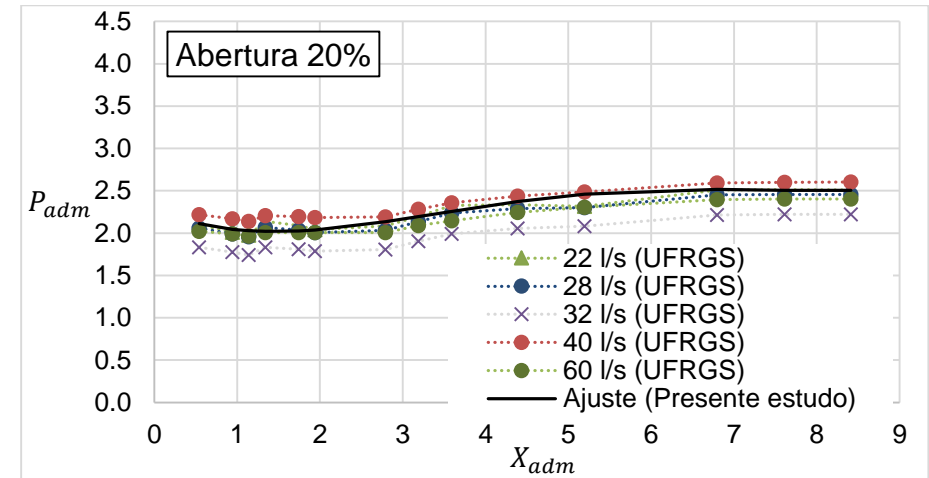


Figura 261 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 20%

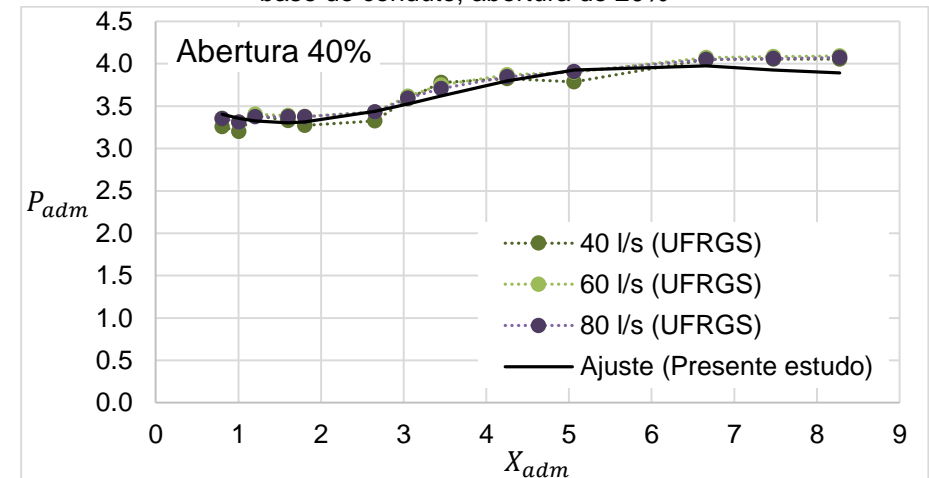


Figura 262 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40%

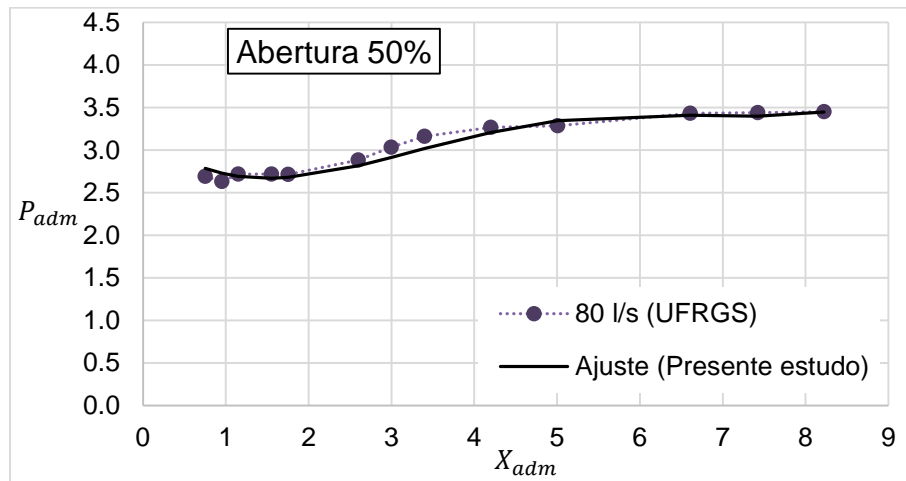


Figura 263 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e pressão média para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 50%

Apêndice T - Verificação do ajuste adimensional de flutuação de pressão

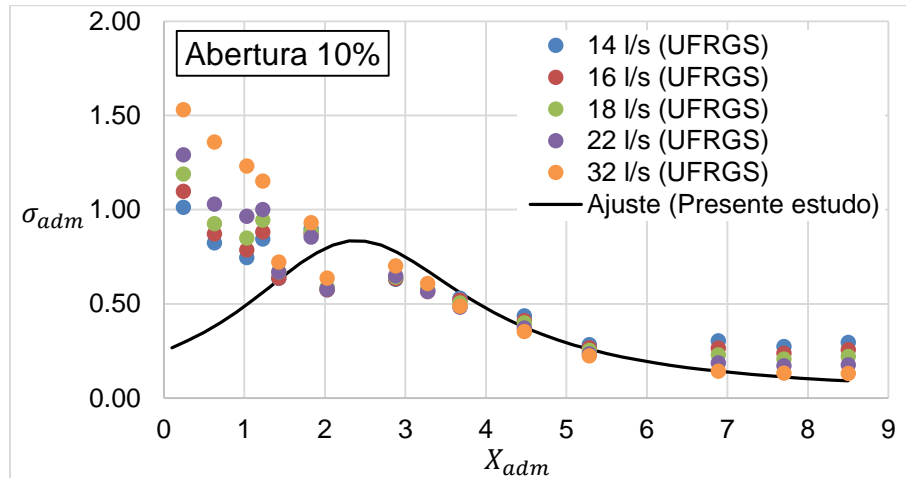


Figura 264 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 10%

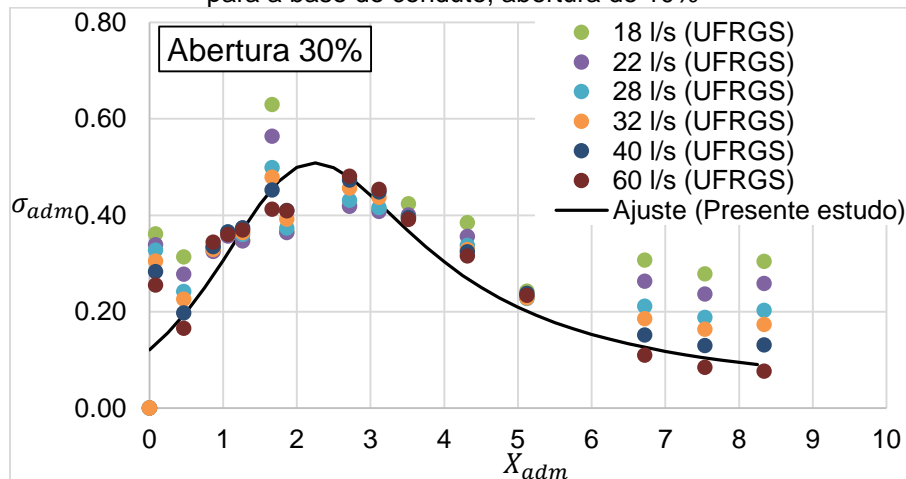


Figura 265 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 30%

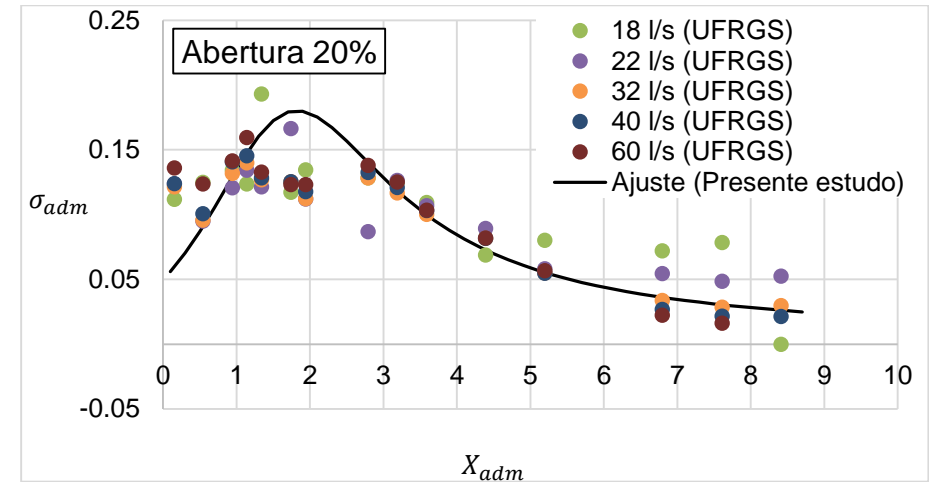


Figura 266 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 20%

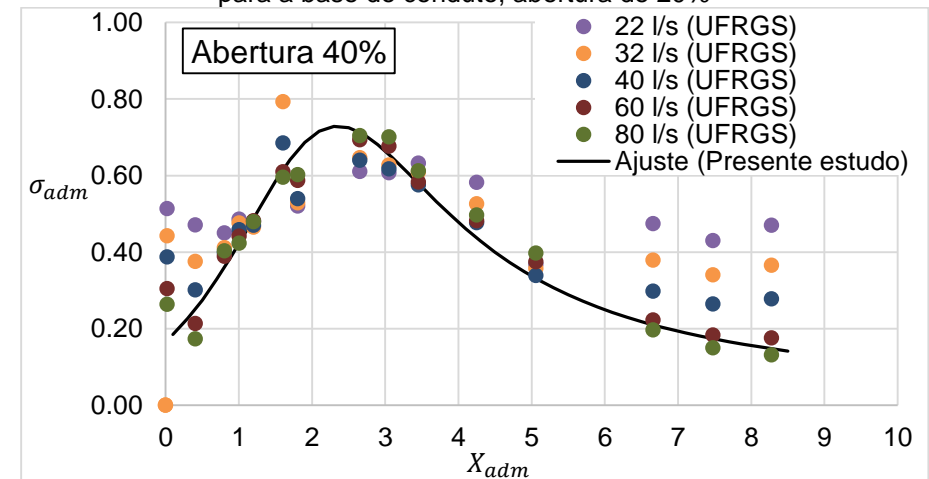


Figura 267 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 40%

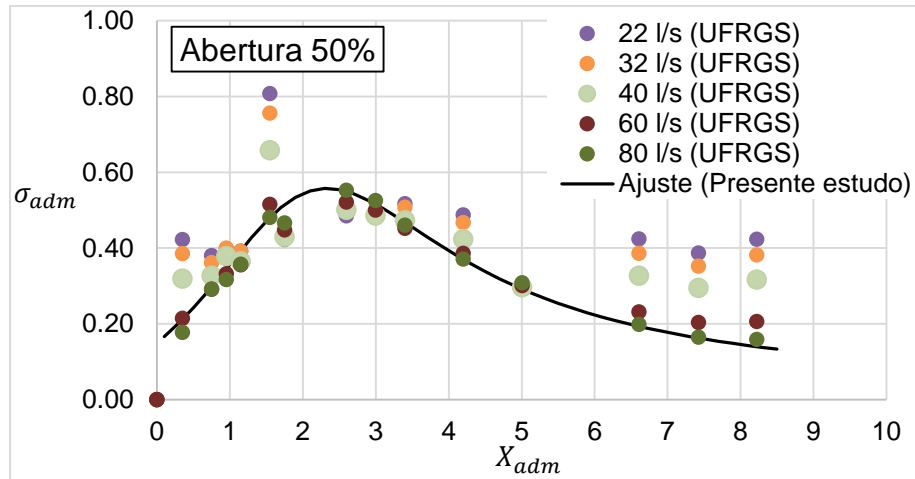


Figura 268 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 50%

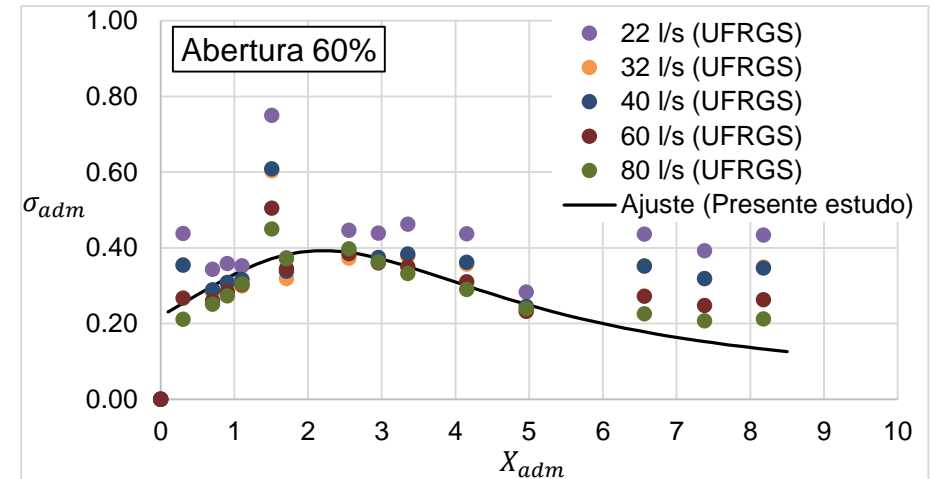


Figura 270 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 60%

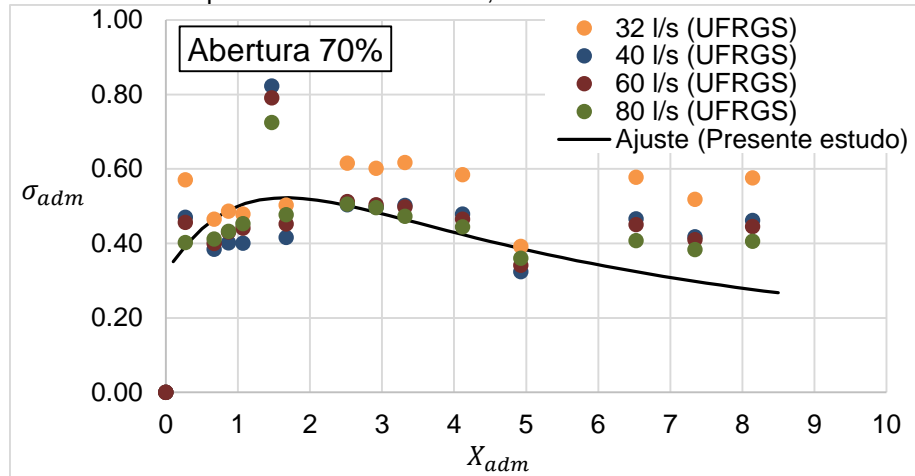


Figura 269 - Relação entre os coeficientes adimensionais de posição e flutuação de pressão para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS para a base do conduto, abertura de 70%

Apêndice U - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

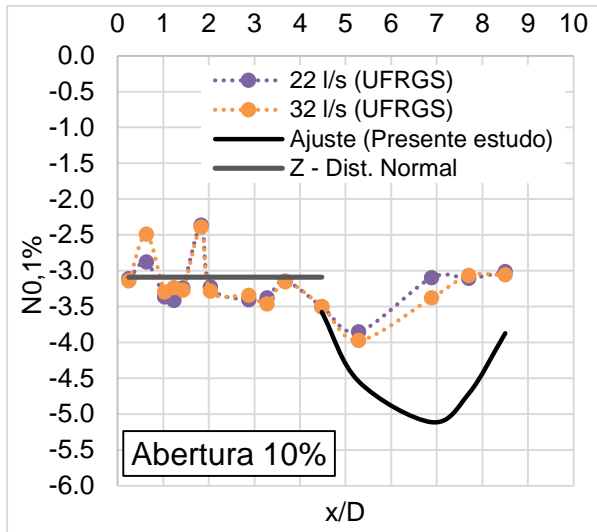


Figura 271 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

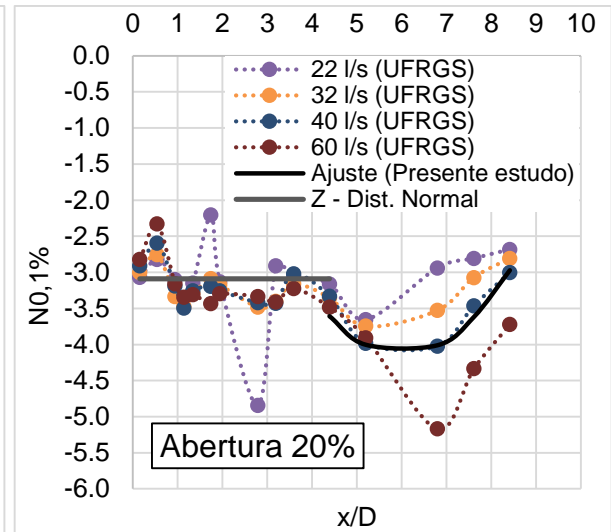


Figura 272 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 20% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

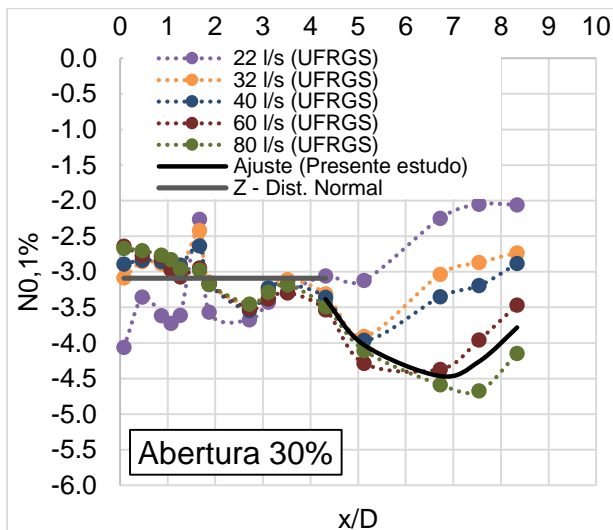


Figura 273 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 30% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

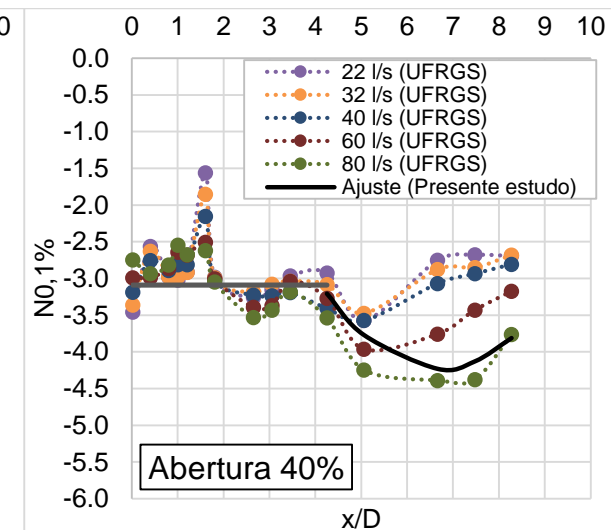


Figura 274 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

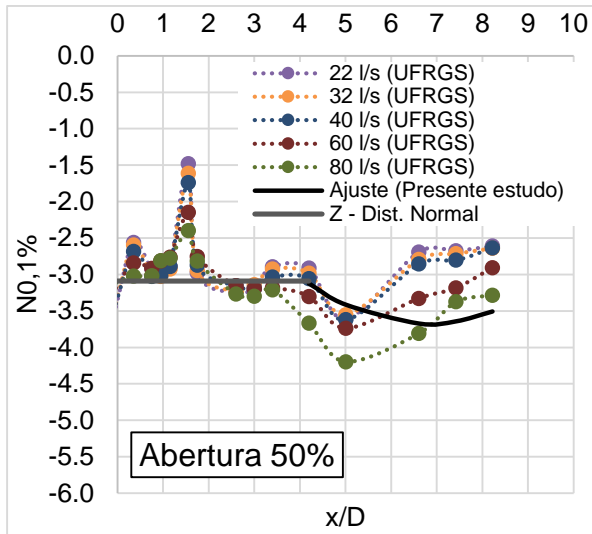


Figura 275 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 50% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

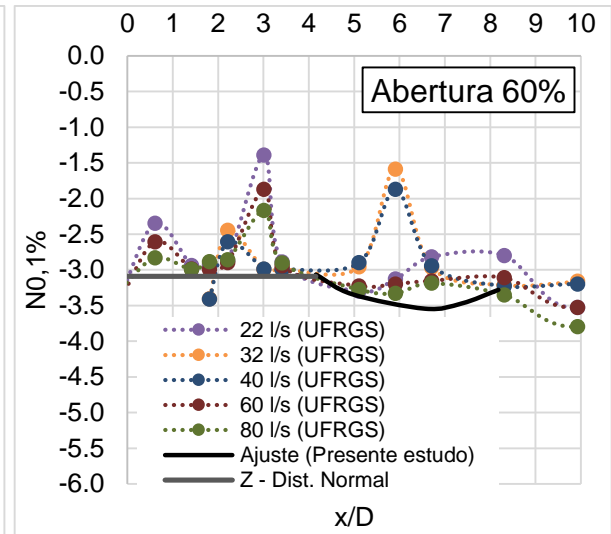


Figura 276 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 60% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

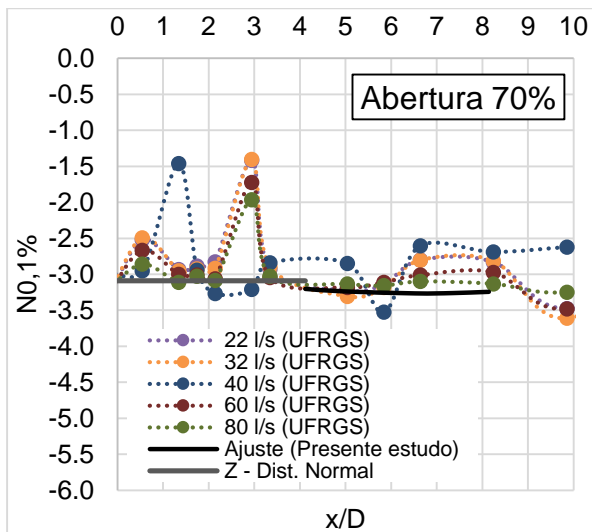


Figura 277 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 70% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

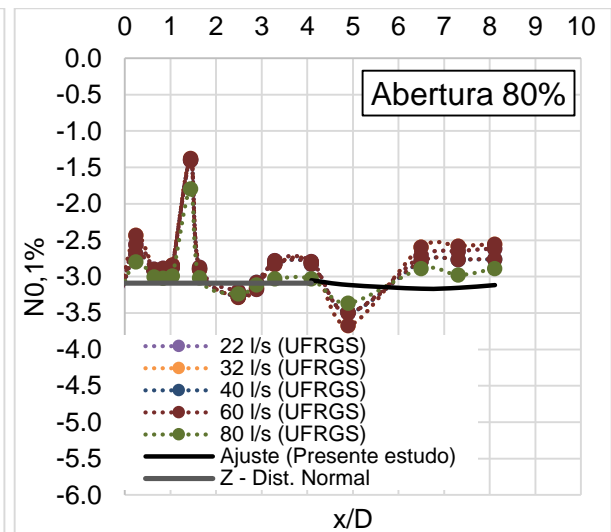


Figura 278 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 0,1%, abertura de 80% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

Apêndice V – Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

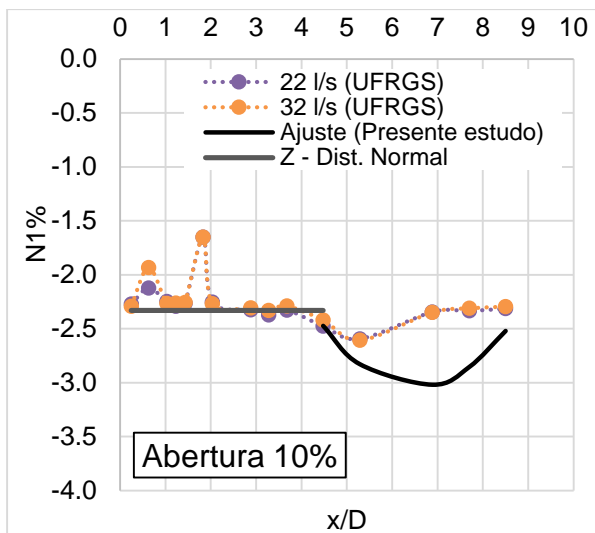


Figura 279 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 10% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

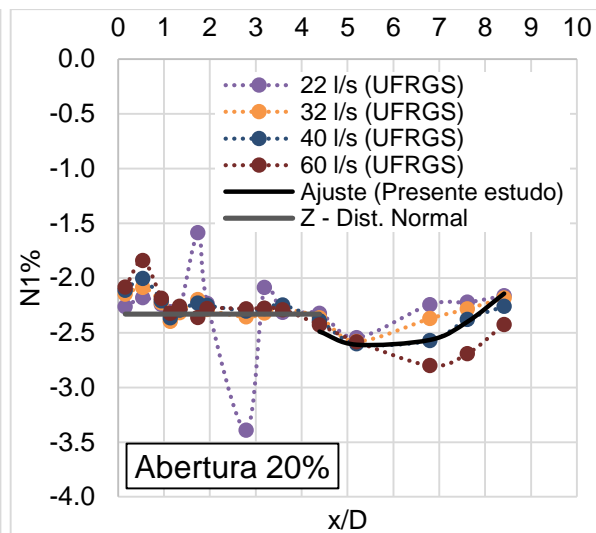


Figura 280 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 20% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

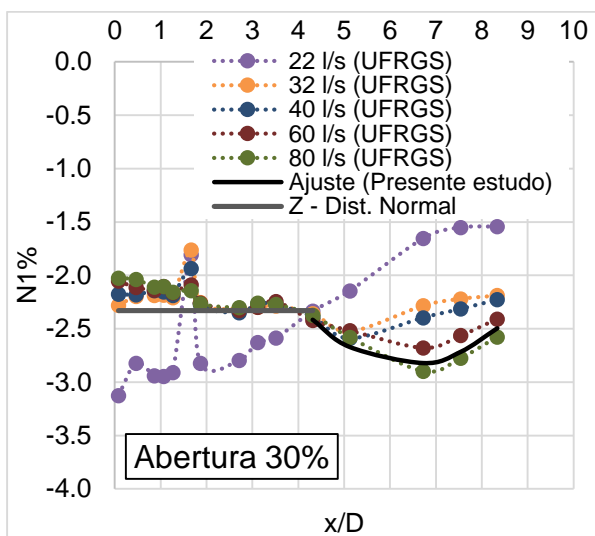


Figura 281 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 30% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

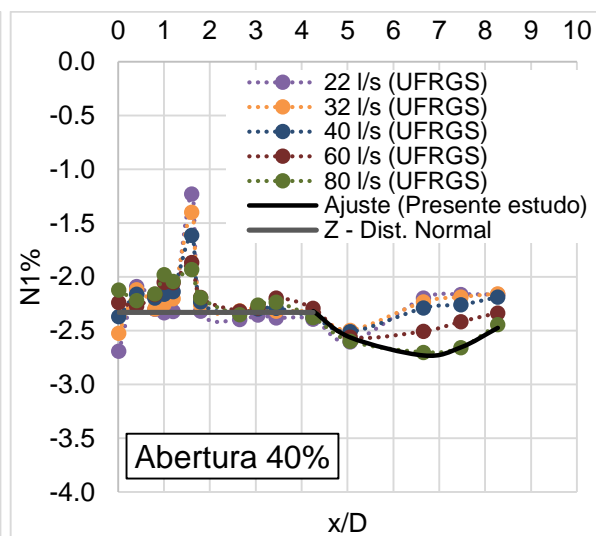


Figura 282 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 40% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

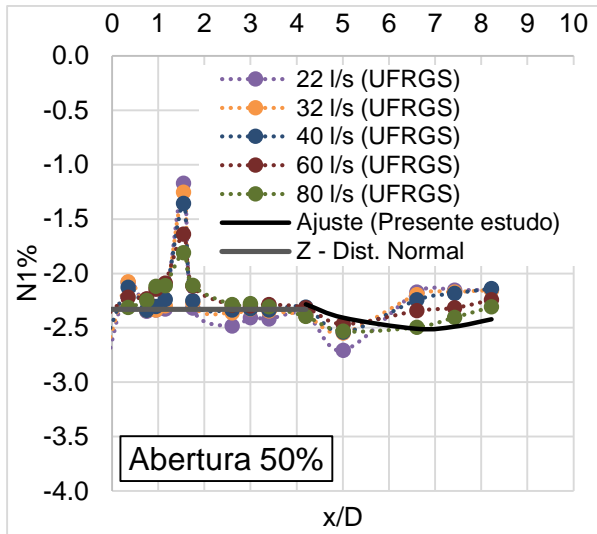


Figura 283 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 50% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

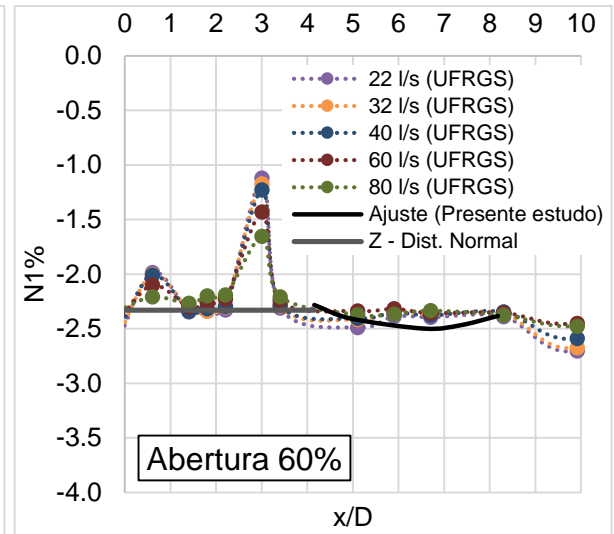


Figura 284 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 60% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

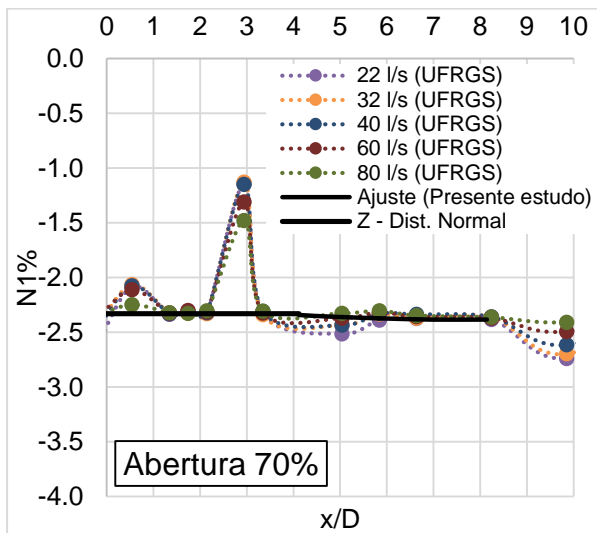


Figura 285 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 70% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS

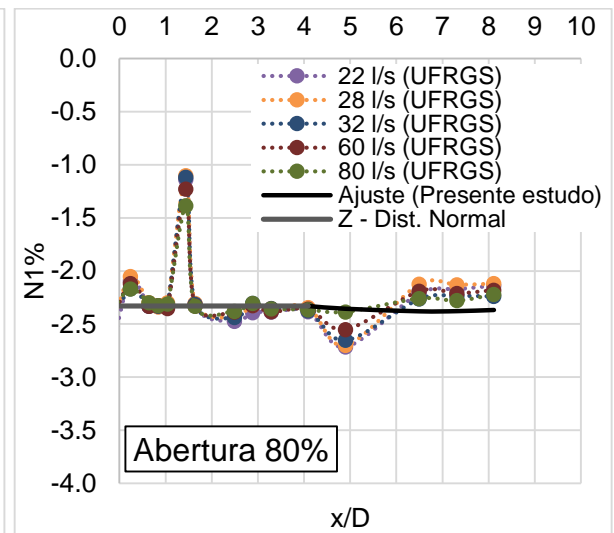


Figura 286 - Coeficiente estatístico de probabilidade de 1,0%, abertura de 80% para os dados obtidos no modelo físico da UFRGS